Archive of SID

نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره سیزدهم، شماره ۴۰، پاییز ۹۷، صفحه ۱۳ تا ۳۳
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol 13, No 40, 2018, pp 13-33 .

مطالعه پترولوژی و کانه‌زایی توده‌های نفوذی دره سه‌هزار تنکابن با هدف تعیین پتانسیل‌های معدنی

میثم یزدانی[۱]، فیروز علی نیا[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، meysamyazdani@aut.ac.ir
[۲] استادیار دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، aliniaf@aut.ac.ir

(دریافت ۲۴ بهمن ۱۳۹۵، پذیرش ۲۰ اسفند ۱۳۹۶)

چکیده

منطقه سه‌هزار در جنوب شهرستان تنکابن در استان مازندران واقع شده است که در نزدیکی کمربند طارم- هشتجین قرار دارد، وجود توده گرانیتوییدی در این منطقه از نظر پتانسیل کانی‌زایی دارای اهمیت است. مجموعه زمین‌شناختی در اطراف محدوده برونزد یافته عمدتا دربرگیرنده واحدهای سنگی پالئوزوئیک تا سنوزوئیک است. در مطالعه اخیر تعدادی نمونه برای مطالعات میکروسکوپی و پتروگرافی و نیز تعدادی نمونه از گرانیت‌های منطقه برای طبقه‌بندی سنگ‌ها مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به بررسی‌های انجام شده بر روی مقاطع صیقلی، کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت مشاهده شدند. بافت‌هایی که در نمونه مقاطع نازک مشاهده می‌شود شامل گرانولار، هیالوپورفیریتیک و ویتروفیریک است. وجود بافت‌های پورفیری نشان‌دهنده نفوذی‌های همزمان با آتش‌فشانی و آواری‌های منشا گرفته از آن‌هاست. کانی‌های اصلی موجود در منطقه شامل کوارتز، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز و در برخی نمونه‌ها هورنبلند بیوتیت و پیروکسن به عنوان کانی اصلی ظاهر شده‌اند. کانی‌های فرعی موجود در نمونه‌ها نیز شامل اسفن، اکسیدهای آهن پیروکسن، آپاتیت و کانی‌های اپک‌اند. مطالعات سنگ‌شناسی نشان داد سنگ‌های منطقه از نوع گرانیت،گرانودیوریت، سینیت تا کوارتزسینیت و کوارتزمونزونیت است. ماگما در این منطقه از نوع آلکالن تا کالک آلکالن و از نوع منیزین و در محدوده متاآلومین تا پرآلومین است. گرانیت‌های منطقه از نوع پرآلومین و دارای جایگاه تکتونیکی حاشیه فعال قاره و از نوع تیپ I است. برای تایید ارتباط بین عناصر Au-Cu-Fe از زمین‌آمار بر روی داده‌های آبراهه‌ای استفاده شد. مطالعات واریوگرافی بر روی داده‌های آبراهه‌ای نشان داد مدل کروی بهترین مدل برازش داده شده و دامنه وابستگی مکانی برای سه عنصر Au, Cu و Fe حدود ۳۵۰ متر است. ارزیابی نتایج زمین‌آمار با محاسبه مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و محاسبه میانگین خطا (MAE) نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل واریوگرام است. با توجه به نمودارهای ماینرت، بررسی‌های انجام شده و همبستگی مکانی عناصر این نتیجه به دست می‌آید که این توده‌ها می‌تواند با ذخایر آهن- طلا- مس مرتبط باشد.

کلمات کلیدی

پتروگرافی، کالک آلکالن، پرآلومین، تیپ I، زمین‌آمار

* نویسنده مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱-مقدمه

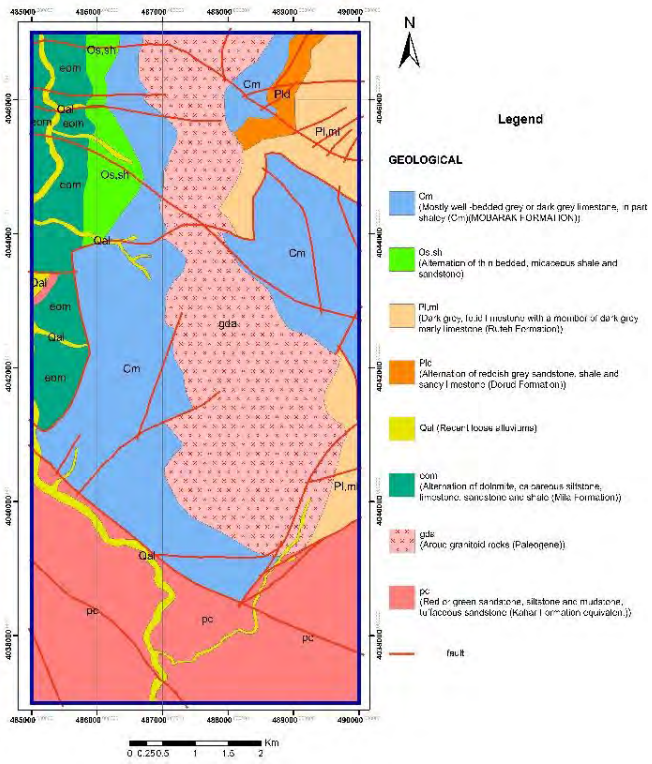
منطقه سه‌هزار در جنوب شهرستان تنکابن در استان مازندران بین عرض جغرافیایی ' 27 °36 و ' 35 °36 شمالی و طول جغرافیایی ' 45 °50 و ' 55 °50 شرقی واقع است که مهم‌ترین توده نفوذی منطقه مربوط به توده گرانیتی منطقه سه‌هزار است. در این منطقه تاکنون مطالعات زیادی انجام نشده است. از جمله مطالعاتی که انجام شده است، پی‌جویی و بررسی لیتوژئوشیمیایی و ژئوشیمیایی آبراهه‌ای توسط شرکت معدن‌کاو در سال ۱۳۷۷، اکتشافات فلزات پایه و عناصر همراه در جنوب چالوس و تنکابن توسط شرکت مهندسین مشاور کاوشگران در سال ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ [۱] است. همچنین در کارهای قبلی انجام گرفته آنومالی شدید آهن از نوع مگنتیت مشخص شده است.

ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌های آذرین تابع ترکیب ماگمایی است که سنگ از آن متبلور شده است. ترکیب ماگما در حین حرکت به سطح زمین و جایگیری آن در اعماق مختلف تغییر کرده است و بنابراین ترکیب عناصر اصلی تحت تاثیر نحوه تکامل ماگما و فرآیندهای موثر بر آن از قبیل تبلور بخشی[۱]، ذوب بخشی[۲]، هضم[۳]، آلایش[۴] و اختلاط ماگمایی[۵] قرار می‌گیرد[۲]. کانی‌زایی در هر کانسار به عوامل متعدد فیزیکوشیمیایی و زمین‌شناسی بستگی دارد که این عوامل تعیین‌کننده ویژگی آن کانسار به شمار می‌روند و در روند کانی‌زایی و توزیع آن در مناطق مختلف و افق‌های مناسب کانسار و در نهایت تمرکز اقتصادی آن موثرند. یکی از عوامل موثر در گسترش کانی‌زایی، نوع سنگ میزبان است که با ویژگی‌هایی از قبیل جنس سنگ، میزان تخلخل و نسبت مواد تشکیل‌دهنده سنگ، کانی‌زایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مطالعه تغییرات و تحولات ایجادشده و پیگیری روند تغییرات در ماگما و سنگ‌های آذرین حاصل از آن بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی انجام می‌گیرد.

مطالعه اولیه بر روی توده‌های نفوذی برای تعیین پتانسیل کانی‌زایی توده نفوذی با موقعیت تکتونیکی، ژئوشیمی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیال کانه‌ساز مرتبط است[۳]. بدین منظور محققان بسیاری در حوزه زمین‌شناسی اقتصادی و پترولوژی به دنبال پیدا کردن رابطه بین توده‌های نفوذی و ذخایر ماگمایی بوده‌اند. هدف از انجام این مطالعه پی بردن به ویژگی‌های ژئوشیمیایی و پترولوژیکی گرانیت‌های منطقه سه‌هزار و ارتباط آن‌ها با کانه‌زایی با استفاده از نرم‌افزارهای EXCEL, GCDkit, Igpet است.

۱-۱- زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

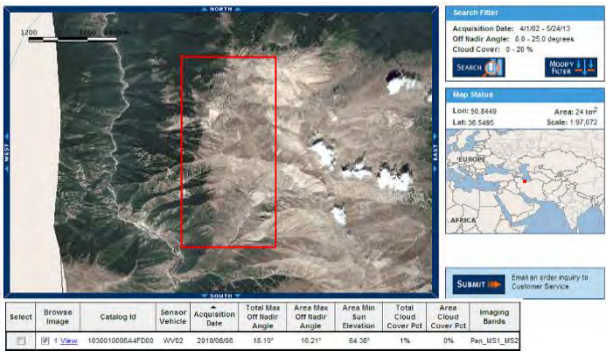
مجموعه زمین‌شناختی در اطراف محدوده برونزد یافته عمدتا دربرگیرنده واحدهای سنگی پالئوزوییک تا سنوزوییک است. قدیمی‌ترین سنگ رخنمون یافته در این ناحیه هم‌ارز سازندهای کهر باروت و لالون است که بیانگر نهشته‌های محیط حاشیه قاره و پس از آن مجموعه آتشفشانی به سن سیلورین نشان‌دهنده مراحل شکست و بازشدگی کامل پلتفرم اولیه است. حضور رسوبات کربناته کربونیفر و کربناته آواری پرمین و تریاس نشان‌دهنده شرایط قاره‌ای و محیط دریایی کم‌عمق است. رسوبات کربنات ژوراسیک میانی و بالایی فاقد پیوستگی با رسوبات کرتاسه بوده و سنگ آتشفشانی روی آن‌ها و سنگ آهک کرتاسه بالا جزو توالی محیط‌های پوسته حاشیه قاره معرفی شده‌اند و پس از آن فعالیت‌های نفوذی ترشیری به صورت توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی قابل مشاهده است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، شکل ۲ موقعیت منطقه مورد مطالعه در تصویر ماهواره‌ای Worldview و شکل ۳ موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه زون‌های ساختاری ایران است.



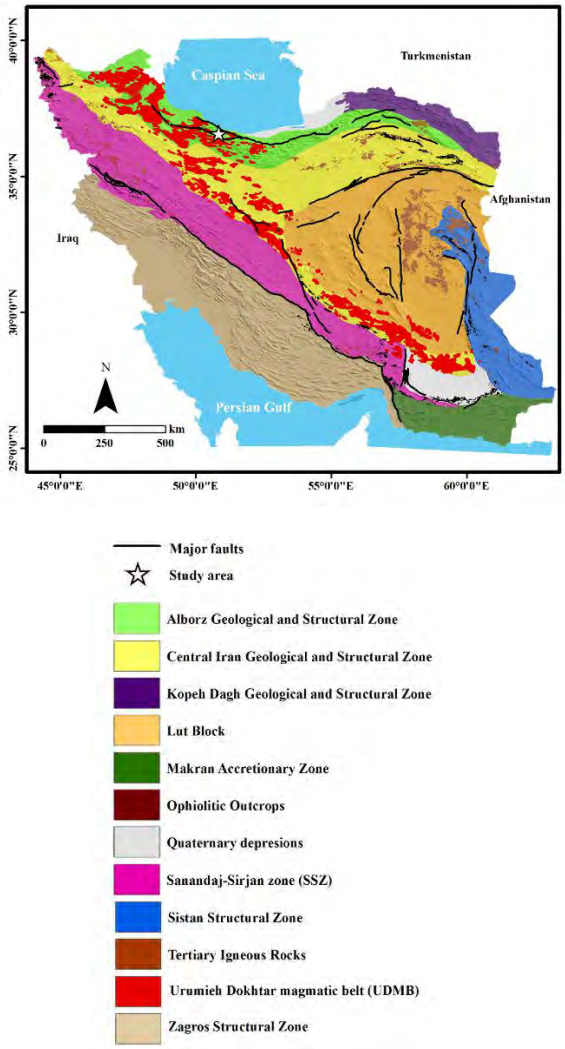
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه سه‌هزار

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- موقعیت محدوده مورد مطالعه در تصویر Worldview



شکل ۳- موقعیت محدوده مورد مطالعه در نقشه زون‌های ساختاری ایران [۴]

۳- روش کار

برای دستیابی به ویژگی‌های پتروگرافی سنگ‌های منطقه با استفاده از سه ویژگی شواهد صحرایی، شواهد توصیفی و خصوصیات بافتی و ساختی سنگ‌ها و استفاده از ژئوشیمی عناصر کمیاب و نادر خاکی و بهنجار کردن[۶] نمونه‌ها، سنگ‌های منطقه از هم تفکیک داده می‌شوند[۵] که برخی از این مطالعات در این مقاله مورد بررسی قرارگرفته‌اند.

برای دستیابی به ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های منطقه از عناصر اصلی و عناصر کمیاب و نسبت‌های بین آن‌ها استفاده شد. به این منظور تعدادی نمونه برای بررسی‌های مربوط به اکسیدهای اصلی از واحدهای سنگی فاقد آثار دگرسانی و هوازدگی برداشت‌شده است. نمونه‌ها از گرانیت‌های منطقه آرود با کمترین آثار دگرسانی و هوازدگی برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی توده نفوذی انتخاب شدند و مورد تجزیه قرار گرفتند. برای بررسی‌های کانی‌شناسی، تعدادی مقطع نازک و صیقلی از سنگ‌های منطقه انتخاب شد.

در این مطالعه برای تایید ارتباط بین عناصر از مطالعات زمین‌آماری و از داده‌های مربوط به ۵۰ نمونه رسوبات آبراهه‌ای دره سه‌هزار تنکابن که در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه ICP-MS تجزیه شدند، استفاده شد و عناصر Au, Cu, W, Fe بررسی شدند.

۳-۲- بررسی مقاطع میکروسکوپی منطقه آرود سه‌هزار

بافت‌هایی که در نمونه مشاهده می‌شود شامل گرانولار[۷]، هیالوپورفیریتیک[۸] و ویتروفیریک[۹] است. وجود بافت‌های پورفیری نشان‌دهنده نفوذی‌های همزمان با آتشفشانی و آواری‌های منشا گرفته از آن‌هاست. کانی‌های اصلی موجود در منطقه شامل کوارتز، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز و در برخی نمونه‌ها هورنبلند بیوتیت و پیروکسن به عنوان کانی اصلی ظاهر شده‌اند. کانی‌های فرعی موجود در نمونه‌ها نیز شامل اسفن، اکسیدهای آهن پیروکسن، آپاتیت و کانی‌های اپک است. بلورهای کوارتز در برخی نمونه‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل و بین منفذی و در بین بلورهای دیگر تشکیل شده‌اند. دگرسانی‌های موجود شامل کربناتی، سیلیسی و سریسیتی شدن است. در طی دگرسانی سریسیتی پلاژیوکلازها به صورت گسترده‌ای به سریسیت تبدیل شده‌اند که در نمونه‌ها قابل رویت است. برخی از رگچه‌های کربناتی زمینه سنگ را به صورت ثانویه قطع کرده است. بلورهای پیروکسن در نمونه اغلب از حاشیه با بیوتیت و هورنبلند جانشین شده است. فنوکریست‌های هورنبلند وجه‌دار و اشکال شش‌گوشه دارند و از نوع قهوه‌ای‌اند و ماکل کارلسباد نشان می‌دهند. فنوکریست‌های بیوتیت وجه‌دار و سطوح رخ مشخص نشان می‌دهند. میانبارهای وجه‌دار و سوزنی آپاتیت درون فنوکریست‌های بیوتیت مشاهده می‌شود.

www.SID.ir

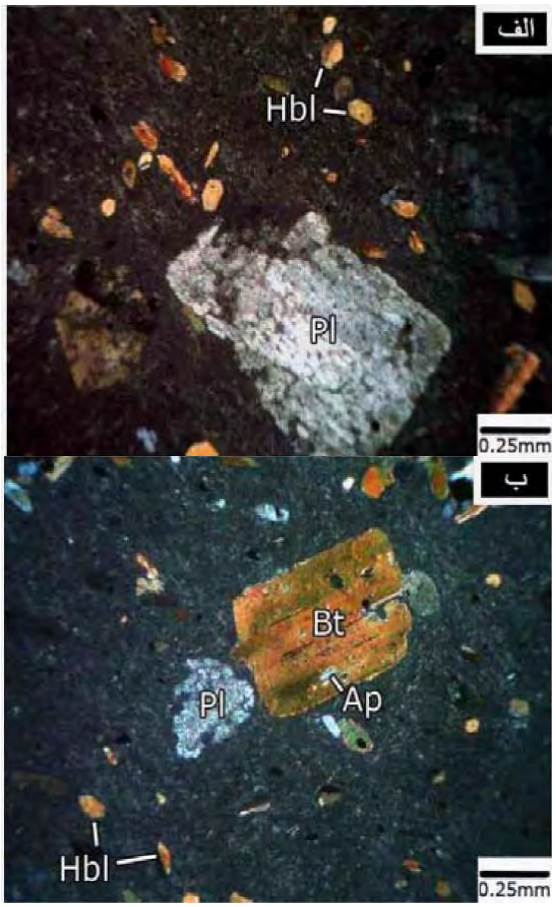
Archive of SID

در بررسی مقاطع صیقلی نیز کانی‌های پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت، هیدروکسیدهای آهن و اکسید تیتانیوم مشاهده شد. پیریت در این نمونه‌ها فراوانی بین ۴ تا ۱۰ دارد و به صورت دانه‌های اتومورف تا نیمه اتومورف پراکنده یا مستقر در شکستگی‌ها و هم به صورت رگچه‌هایی مشاهده می‌شود. ابعاد دانه‌ها از ۳۳ تا ۴۳۳ میکرون در تغییر است. پیریت‌ها سالم‌اند و اثر آلتراسیون و هوازدگی بندرت در آن‌ها دیده می‌شود و فقط تعداد کمی از آن‌ها به وسیله هیدروکسید آهن جانشین شده‌اند. کالکوپیریت‌ها به تعداد انگشت‌شمار و با ابعاد ۱۳ تا ۲۳ میکرون در تماس با پیریت‌ها استقرار یافته‌اند. اکسید تیتانیوم با فراوانی کمتر از ۳ درصد به صورت دانه‌های بی‌شکل پراکنده و در نمونه‌ها حضور دارد. پیروتیت با فراوانی حدود ۳ درصد به صورت دانه‌های حداکثر ۳۳ میکرونی پراکنده در نمونه مشاهده می‌شود. اکثریت آن‌ها در اثر عملکرد زون سوپرژن با پیریت و مارکاسیت در حال جانشینی‌اند.

۳-۳- رده‌بندی سنگ‌های منطقه

۳-۳-۱- رده‌بندی نورماتیو اشتریکایزن

طبقه‌بندی اشتریکایزن[10] [۶] یکی از اولین طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین بر اساس مقدار کانی‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها است. این طبقه‌بندی با تمرکز بر تفاوت در فراوانی و ترکیب فلدسپارها طیف گسترده‌ای از گرانیتوییدها را مشخص می‌کند. این رده‌بندی بر اساس درصد کانی‌های مجازی محاسبه‌شده از روی نتایج تجزیه شیمیایی انجام می‌گیرد. محاسبه نورم به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که متداول‌ترین آن‌ها روش CIPW[11] است.

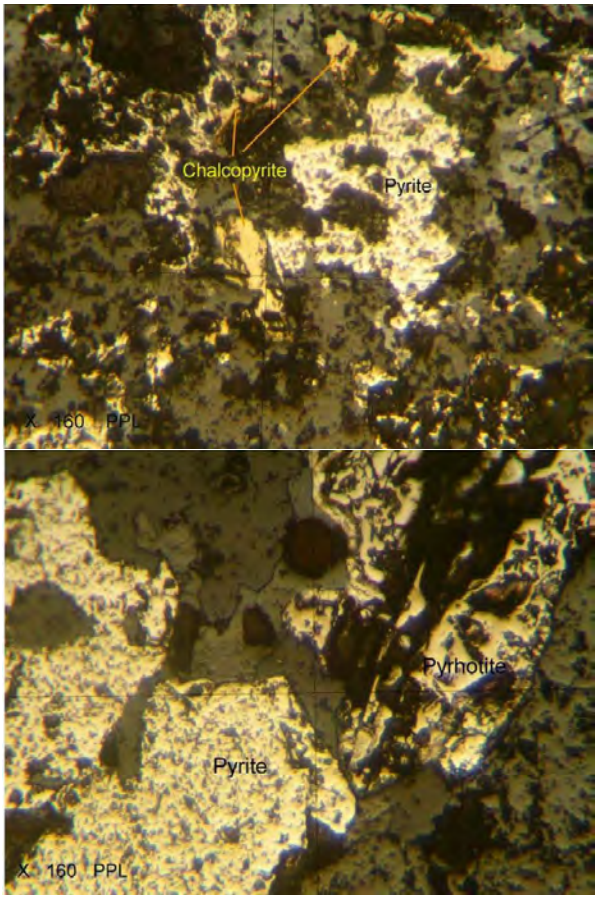


شکل ۴- الف) بلور فنوکریست پلاژیوکلاز به همراه فنوکریست‌های وجه‌دار هورنبلند کوچک‌تر در خمیره شیشه‌ای، ب) فنوکریست بیوتیت با میانبار آپاتیت به همراه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و هورنبلند در خمیره شیشه‌ای

استفاده از طبقه‌بندی نورماتیو در بسیاری از مطالعات سنگ‌شناسی سنگ‌های ولکانیکی رایج است. در این نمودار نمونه‌ها به آسانی وارد می‌شوند و یک طبقه‌بندی غیرژنتیکی است. پس از محاسبه کانی‌های نورم به روش CIPW و واردکردن نمونه‌ها در نمودار QAP همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بر اساس این طبقه‌بندی سنگ‌های نفوذی منطقه در محدوده کوارتزمونزودیوریت، مونزوگرانیت، گرانودیوریت، کوارتزمونزونیت، مونزونیت و مونزودیوریت قرار دارند.

www.SID.ir

Archive of SID



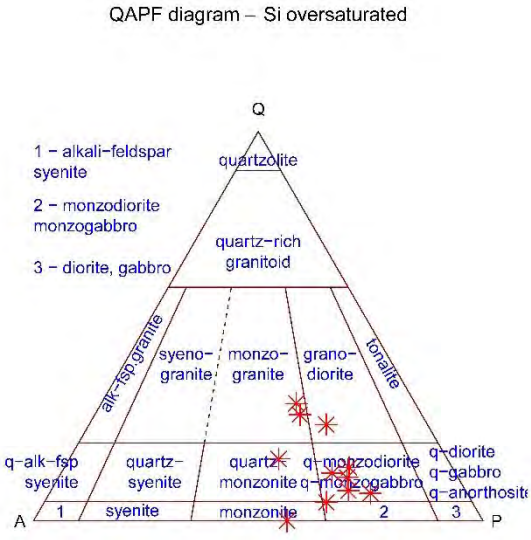
شکل ۵- نمایی از پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت در زیر میکروسکوپ (پیروتیت‌ها در اثر آلتراسیون سوپرژن در حال تبدیل به مخلوطی از پیریت و مارکاسیت‌اند.)

۳-۲-۲- نامگذاری با استفاده از مجموع آلکالن در مقابل سیلیس(روش TAS)

این روش نخستین بار توسط کاکس و همکاران [۷] و کرمنتسکی و همکاران و در نهایت با تغییراتی توسط لومیتر ارایه شده است. در این تحقیق از دو نمودار میدلموست [۸] و کاکس و همکاران [۷] استفاده شد.

۳-۲-۳- رده‌بندی میدلموست (۱۹۹۴)

بر اساس این رده‌بندی سنگ‌های نفوذی منطقه در محدوده‌های گرانیت، کوارتزمونزونیت، کوارتز سینیت و سینیت قرار می‌گیرد. یک نمونه در مرز تونالیت و کوارتزمونزودیوریت و نمونه دیگر در محدوده گابرو وجود دارد که با توجه به مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی نوع سنگ ممکن است، مونزودیوریت باشد (شکل ۷).



شکل ۶- نمودار مودال نورماتیو تعیین‌کننده رده سنگ‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه

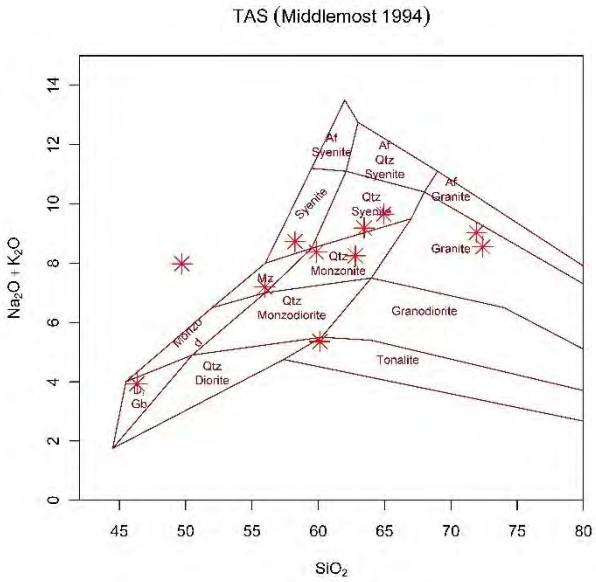
۳-۲-۴- نمودار کاکس و همکاران (۱۹۷۹)

از ویژگی‌های مهم این نمودار وجود خطی است که محدوده سنگ‌های آلکالن و ساب آلکالن را از هم جدا می‌کند و از طریق قرار گرفتن نقاط مربوط به نمونه‌ها می‌توان روند تحولات ماگمایی را نیز تا حدودی استنباط کرد [۹]. بدین نحو که اگر با افزایش سیلیس میزان عناصر آلکالن نیز افزایش تدریجی نشان دهد احتمالا روند تفریق در ماگما به واسطه تبلور معلوم می‌شود و اگر با کاهش یا ثابت ماندن سیلیس محتوای آلکالن نمونه‌ها سیر صعودی نشان دهد، می‌توان ذوب بخشی را برای منشا ماگما در نظر گرفت.

با توجه به این نمودار (شکل ۸) سنگ‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه بیشتر در منطقه آلکالی و در بخش میانی مشترک نزدیک به سینیت و سینودیوریت است. دو نمونه در منطقه گرانیت قرار دارد. بر اساس شیب قرارگیری نمونه‌ها به نظر می‌رسد که در ترکیب شیمیایی سنگ‌های منطقه سه‌هزار ذوب بخشی نقش مهمی ایفا کرده است زیرا تغییرات آلکالی‌ها در مقابل سیلیس شیب زیادی نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

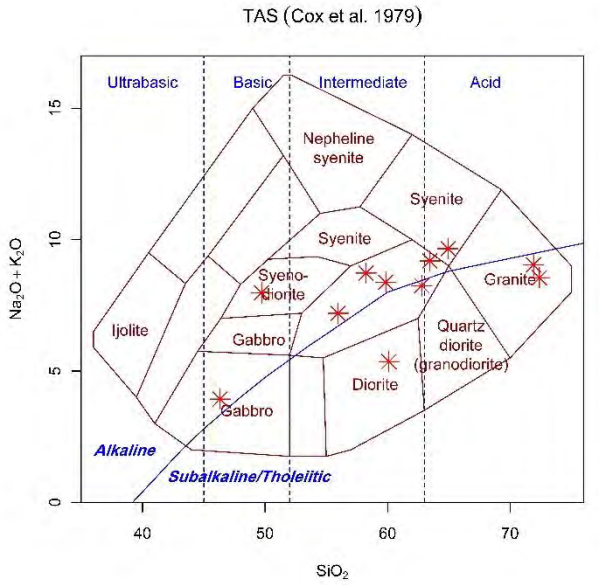


شکل ۷- نامگذاری سنگ‌های نفوذی دره سه‌هزار با استفاده از تقسیم‌بندی TAS (آلکالی کل در برابر سیلیس)، میدلموست (۱۹۹۴)

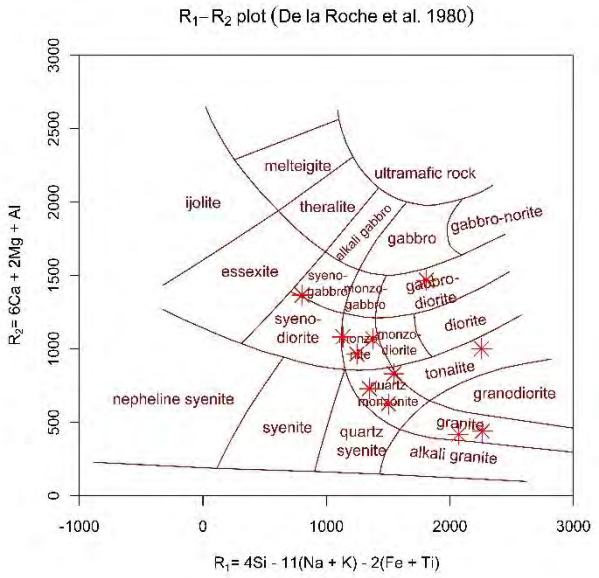
۳-۲-۵- رده‌بندی شیمیایی دلاروش و همکاران با استفاده از تمام عناصر به استثنای اکسیژن

دلاروش و همکاران [۱۰] سنگ‌های آذرین را با استفاده از نسبت‌های میلی‌کاتیونی Si,Na,k و نظایر آن که به صورت پارامترهای R_1 و R_2 ارایه می‌شوند، رده‌بندی کردند. در طبقه‌بندی مزبور خواص شیمی سنگ بر حسب تشکیل‌دهنده‌های کانی‌شناسی به صورت پارامترهای کاتیونی بیان می‌شوند.

به اعتقاد دلاروش و همکاران این نمودار، قابلیت استفاده بیشتری نسبت به رده‌بندی بر مبنای نرم دارد و رولینسون [۱۱] استفاده از آن را برای سنگ‌های پلوتونیک با توجه به مواردی مانندکاربرد آن در مورد تمام انواع سنگ‌ها، استفاده از ویژگی‌های شیمیایی عناصر اصلی سنگ در رده‌بندی، امکان مقایسه داده‌های مودال و شیمی و مشخص ساختن ترکیبات فلدسپات و درجه اشباع از سیلیس توصیه می‌کند. در نمودار دلاروش سنگ‌های نفوذی منطقه در محدوده‌های کوارتزمونزونیت، مونزونیت و گرانیت است (شکل ۹).



شکل ۸- مطالعه سنگ‌های نفوذی منطقه سه‌هزار با استفاده از تقسیم‌بندی TAS (آلکالی کل در برابر سیلیس)، کاکس و همکاران



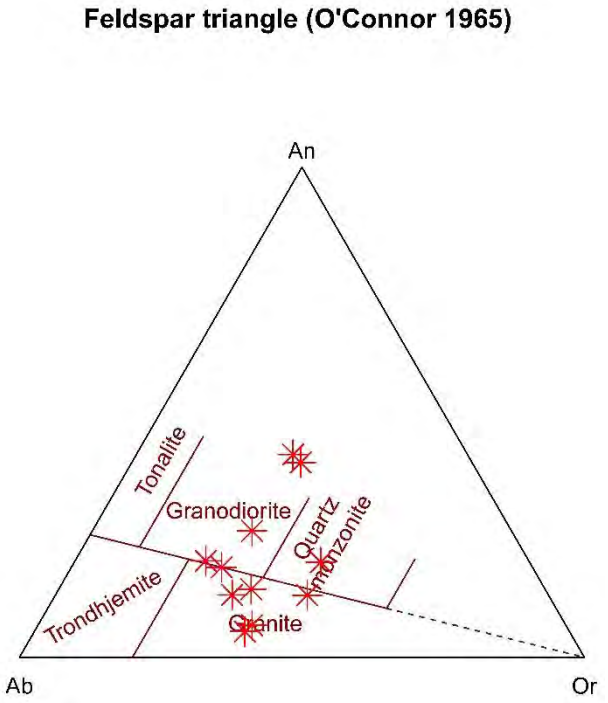
شکل ۹- مطالعه سنگ‌های نفوذی منطقه سه‌هزار با استفاده از تقسیم‌بندی دلاروش

۳-۲-۶- رده‌بندی O`Connor (۱۹۶۵)

بارکر[۱۲] [۱۲] (۱۹۷۹)، اوکونر[۱۳] [۱۳] (۱۹۶۵) و عبدل رحمان[۱۴] [۱۴] (۱۹۹۰) گرانیتوییدها را با استفاده از دیاگرام مثلثی آلبیت- ارتوکلاز- آنورتیت نورماتیو طبقه‌بندی کرده‌اند. مطابق این رده‌بندی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده‌های گرانیت، گرانودیوریت و کوارتزمونزونیت قرار می‌گیرد (شکل ۱۰).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰- نمودار O`Connor

۳-۳- مطالعات ژئوشیمیایی منطقه سه‌هزار

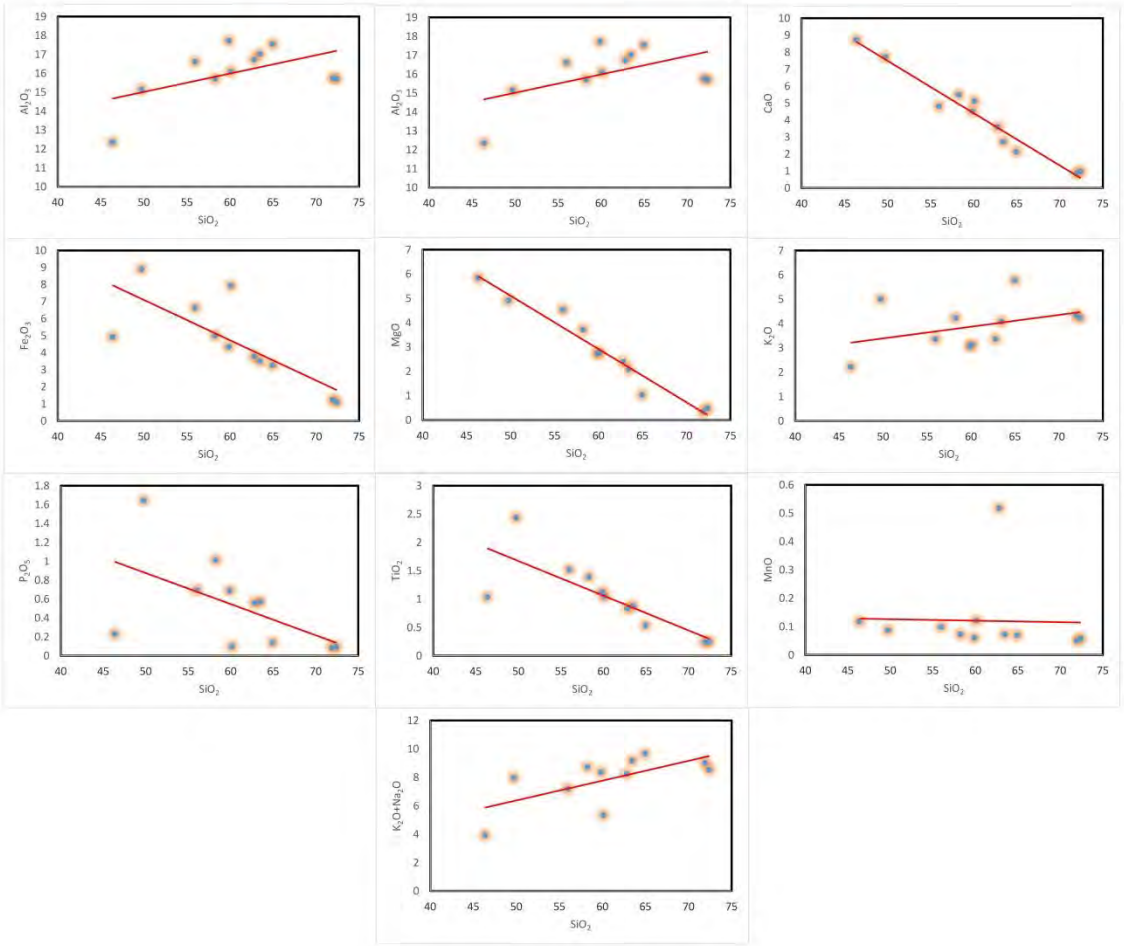
مطالعه بر روی تغییرات و تحولات ایجادشده و دنبال کردن روند حوادث رخداده در ماگما و سنگ‌های حاصل از آن با روش‌های ژئوشیمیایی انجام می‌گیرد. برای شناسایی و مطالعه روند تغییرات و تحولات ماگمایی از نمودارهای دومتغیره مختلفی که توسط پترولوژیست‌ها ارائه شده، استفاده می‌شود. این نمودارها از عناصر اصلی یا فرعی و یا ترکیبی از هر دو آن‌ها حاصل‌شده و ابزاری سودمند برای بررسی تعداد زیادی از داده‌ها است که مقایسه آن‌ها به صورت جدول‌ها کاملا مشکل است [۱۵]. با استفاده از این نمودارها می‌توان اطلاعات باارزشی از فرآیند ذوب بخشی، تبلور تفریقی، اختلاط ماگمایی و آلودگی پوسته‌ای در تشکیل یا تبلور یک ماگما به دست آورد.

۳-۳-۱- بررسی تغییرات عناصر اصلی در توده نفوذی منطقه سه‌هزار

یکی از انواع متداول نمودارهای تغییرات عناصر اصلی در سنگ‌شناسی آذرین، نمودارهای هارکر است که در آن درصد وزنی تمام اکسیدها نسبت به درصد وزنی SiO_2 سنجیده می‌شود ([۱۶] و [۱۷]). در این بخش، تغییرات برخی از عناصر اصلی در مقابل SiO_2 بررسی‌شده است (شکل ۱۱).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۱- نمودارهای تغییرات عناصر اصلی در برابر SiO_2 (درصد) (نمودار هارکر)

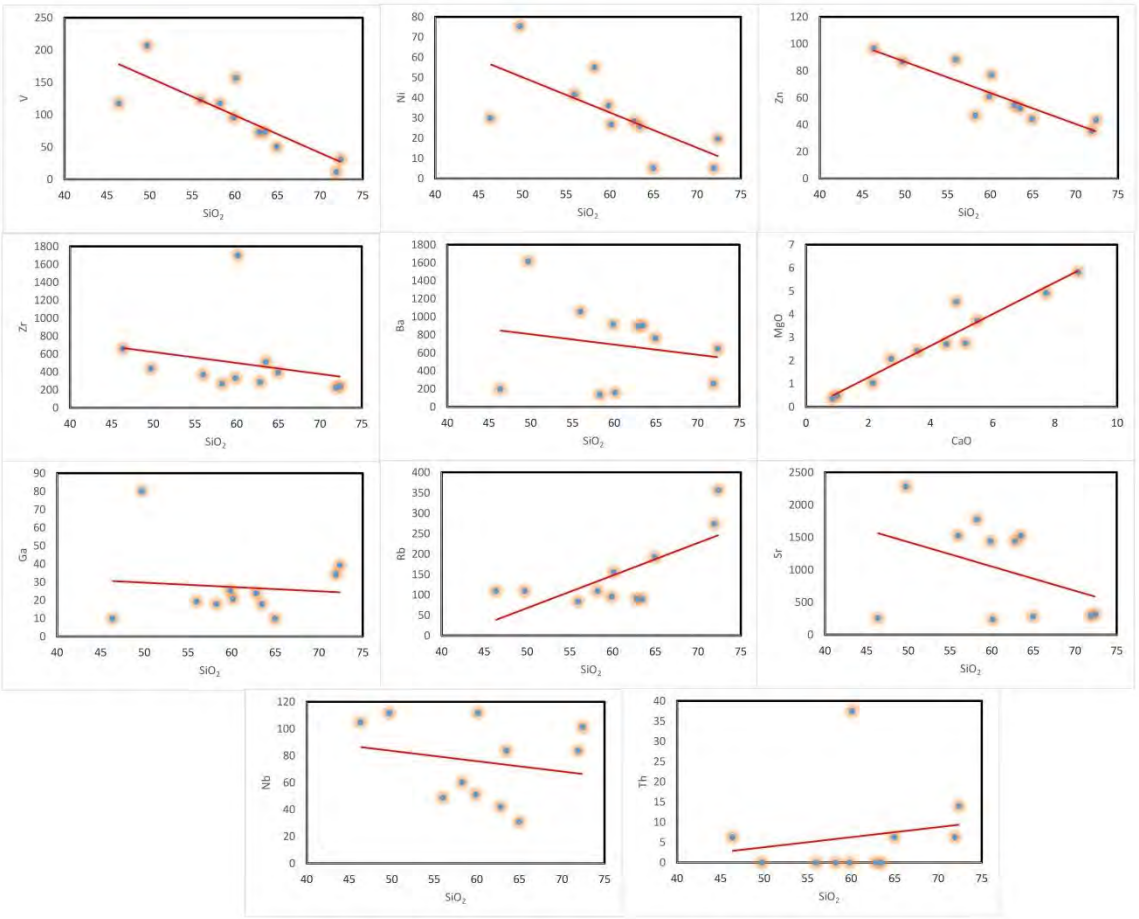
در نمودارهای هارکر مربوط به اکسیدهای اصلی (شکل ۱۱)، به‌واسطه تشکیل و جدایش کانی‌های فرومنیزین مانند پیروکسن، ابتدا میزان Al_2O_3 افزایش می‌یابد سپس با پیشروی به سوی سنگ‌های اسیدی به واسطه تشکیل پلاژیوکلاز از میزان این اکسید کاسته می‌شود. MgO در مراحل نخستین تبلور در ساختمان کانی‌های مافیک مصرف شده است، بنابراین با افزایش SiO_2 مقدار MgO کاهش می‌یابد. روند کاهشی CaO با گرایش ترکیب پلاژیوکلازها به سمت ترکیبات دارای آنورتیت کمتر و آلبیت بیشتر در سنگ‌های اسیدی مطابقت دارد. روند کاهشی Fe_2O_3 به سمت سنگ‌های اسیدی نشان می‌دهد که در سنگ تفریق یافته‌تر میزان آهن کمتر است زیرا آهن در ساختمان سیلیکات‌های فرومنیزین شرکت می‌کند. روند تغییرات TiO_2 تقریبا با تغییرات Fe_2O_3 مشابه است و دلیل این تشابه نزدیک بودن ویژگی‌های ژئوشیمیایی آهن و تیتانیم (شعاع یونی نزدیک به هم) است. تیتانیم در کانی‌های آهن‌دار از قبیل بیوتیت جانشین می‌شود و مقداری از آن نیز در ترکیب اسفن جای گرفته است. روند نزولی P_2O_5 در مقابل SiO_2 می‌تواند نشانگر گرانیت تیپ I باشد. نمودار تغییرات آلکالی ($K_2O + Na_2O$) در مقابل سیلیس روندی صعودی اما پراکنده دارد که با افزایش میزان آلبیت در سنگ‌های اسیدی و تبلور آلکالی فلدسپارها در گرانودیوریت سازگار است. نمودار CaO در مقابل MgO به صورت صعودی است که نشانگر مصرف همزمان CaO و MgO و تشکیل کلینوپیروکسن است.

۳-۳-۲- بررسی تغییرات عناصر کمیاب در توده نفوذی منطقه سه‌هزار

عناصر کمیاب، عناصری‌اند که مقدار آن‌ها در سنگ کمتر از ۰/۱ درصد و یا کمتر از ۱۰۰۰ppm باشد [۱۸]. این عناصر رفتار بسیار حساسی در تحولات ماگمایی دارد و در تعبیر و تفسیرهای پترولوژی و مشخص کردن جایگاه تکتونیکی سنگ‌ها موثر است. در این بخش تغییرات برخی عناصر کمیاب در مقابل SiO_2 مورد بررسی قرارگرفته است (شکل ۱۲).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲- نمودارهای تغییرات عناصر کمیاب (ppm) در برابر SiO_2 (درصد) (نمودار هارکر)

روند نزولی Sr به سمت گرانودیوریت کاملا محسوس است. این وضعیت با روند عادی تفریق که در آن با افزایش SiO_2 از مقدار آنورتیت پلاژیوکلازها کاسته می‌شود مطابقت دارد. در نمودار Zr روند نزولی با شیب کم مشاهده می‌شود و از آنجایی که در سنگ‌های مورد مطالعه در جایی که سیلیس پایین است مقدار زیرکن بالاست، با حرکت به سمت گرانودیوریت که بیوتیت کمی دارد مقدار زیرکن کاهش می‌یابد. Nb روندی نزولی نشان می‌دهد که می‌تواند به علت وجود احتمالی در ساختمان آمفیبول و یا جایگزینی این عنصر با Ti باشد. نمودار Ni روندی نزولی از خود نشان داد که نشانگر مصرف نیکل در شبکه پیروکسن و کانی فلزی مانند مگنتیت است. در نمودار Ba روند نزولی مشاهده می‌شود که می‌تواند به علت حضور در ساختمان پلاژیوکلاز یا هورنبلند باشد. روند نزولی وانادیوم به طرف گرانودیوریت‌ها به این دلیل است که وانادیوم عمدتا جانشین Fe^{2+} در ساختمان مگنتیت می‌شود و در ترکیب آمفیبول و بیوتیت نیز تجمع می‌یابد. Th به دلیل آن که مقدار این عنصر در سنگ‌های تفریق‌یافته و اسیدی بیشتر است با افزایش مقدار سیلیس روندی صعودی نشان می‌دهد (شکل ۱۲).

در نمودارهای هارکر عناصر اصلی روند تغییرات نسبتا منظم است و با افزایش SiO_2، مقادیر TiO_2، MgO، CaO، Fe_2O_3، P_2O_5 سیر نزولی نشان می‌دهد. روند نزولی MgO و CaO ممکن است نشانگر بالا بودن درصد کانی‌های فرومنیزین و تبلور بخشی هورنبلند، بیوتیت، پلاژیوکلاز، مگنتیت و تراکم عناصر ناسازگار در باقیمانده ماگمای سنگ‌های مورد مطالعه باشد. روند نزولی TiO_2 مربوط به مشارکت Ti در ساختمان مگنتیت، پیروکسن و سایر کانی‌های فرومنیزین و تبلور تفریقی این فازهاست. بر اساس نتایج به دست آمده در بررسی‌های نمودارهای هارکر مربوط به اکسیدهای عناصر اصلی و عناصر کمیاب می‌توان نتیجه گرفت که توده گرانیتوییدی منطقه می‌تواند تیپ I باشد به گونه‌ای که دارای آغشتگی به پوسته نیز است.

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۴- تعیین سری ماگمایی سنگ‌های نفوذی منطقه

یکی از مهم‌ترین اهداف در بررسی‌های پترولوژیکی سنگ‌های یک منطقه تعیین سری ماگمایی سنگ‌هاست. بر طبق نظر کونو [۱۹] یک سری ماگمایی شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین با ترکیب شیمیایی متفاوت است که از یک ماگمای مادر در نتیجه تفریق بلورین حاصل شده است، هر چند با توجه به دانسته‌های جدید نقش عوامل دیگری چون آلایش ماگمایی، ذوب‌بخشی با درجات متفاوت و اختلاط ماگمایی را که ممکن است سنگ‌های مختلف را در یک سری وابسته کاذب قرار دهند، نمی‌توان نادیده گرفت. به طورکلی پنج سری ماگمایی به شرح زیر شناخته شده‌اند[۲]:

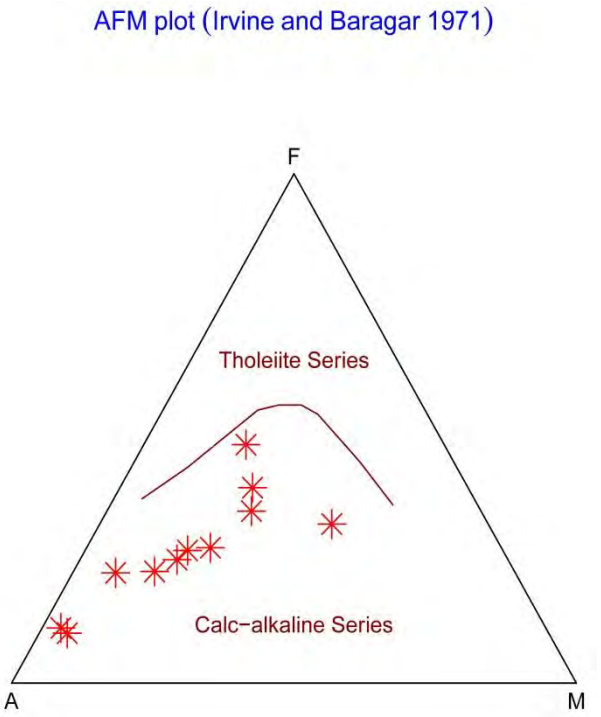
۱- سری تولئیتی[۱۵]، ۲- سری آلکالن[۱۶]، ۳- سری کالک آلکالن[۱۷]، ۴- سری شوشونیتی[۱۸]، ۵- سری تحولی[۱۹]

هرکدام از این سری‌ها ویژگی‌های کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و شیمیایی مخصوص به خود را دارند و این ویژگی‌ها در تعیین و تشخیص نوع سری‌ها نقش اساسی ایفا می‌کنند. در مطالعه حاضر برای تعیین سری ماگمایی سنگ‌های منطقه مزبور از دیاگرام‌های متفاوتی استفاده شده که در زیر به آن‌ها اشاره شده است.

۳-۴-۱- نمودار اروین و باراگار

اروین و باراگار(۱۹۷۱) [۲۰] برای تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آذرین از نمودار مجموع آلکالن در مقابل سیلیس و نمودار مثلثی FeO, MgO, Na_2O+K_2O استفاده کردند. این نمودار نمونه‌های آلکالن را از نمونه‌های ساب‌آلکالن جدا می‌کند. سپس نمونه‌های ساب‌آلکالن به وسیله نمودار AFM به ماگمای کالک‌آلکالن و ماگمای تولئیتی تقسیم می‌شود (شکل ۱۳).

برای تعیین تولئیتی بودن یا کالک‌آلکالن بودن نمونه‌های ساب‌آلکالن از نمودار AFM استفاده می‌شود که نمونه‌ها در حوزه ماگمای کالک‌آلکالن قرار می‌گیرد. در نتیجه سری ماگمای توده نفوذی منطقه بر اساس طبقه‌بندی آروین و باراگار در سری آلکالن تا کالک‌آلکالن قرار می‌گیرد.



شکل ۱۳- نمودار AFM برای تقسیم‌بندی نمونه‌ها به ماگمای کالک آلکالن و تولئیتی

۳-۴-۲- نمودار کاکس و همکاران (۱۹۷۹)

طبق این نمودار که در بخش تعیین تیپ سنگ‌شناسی آورده شده است (شکل ۸)، مانند نمودار باراگار بیشتر نمونه‌ها در حوزه ماگمای آلکالن قرار گرفت و چهار نمونه در این نمودار نیز در حوزه ماگمای ساب‌آلکالن قرار گرفت.

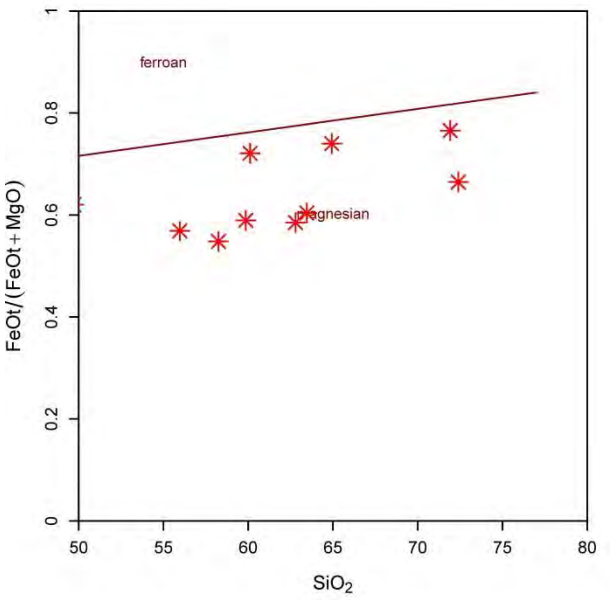
۳-۴-۳- نمودارهای فراست و همکاران(۲۰۰۱)

فراست و همکاران [۲۱] بر پایه سه متغیر شامل FeO / (FeO+MgO)= Fen شاخص آلکالن-کلسیک اصلاح‌شده (MALI) یعنی $Na_2O + K_2O - Ca$ و شاخص اشباع آلومین (ASI) یک رده‌بندی ژئوشیمیایی برای سنگ‌های گرانیتوییدی ارایه کردند. این محققان با استفاده از پارامترهای FeO / (FeO+MgO) و SiO_2 نمودارهای جدیدی برای تمایز سری‌های تولئیتی و کالک‌آلکالن پیشنهاد کرده‌اند. در این نمودارها سری‌های یاد شده به ترتیب با نام‌های آهنی[۲۰] و منیزیمی[۲۱] نامگذاری شده‌اند (شکل ۱۴). در این نمودارها عدد آهن متمایزکننده گرانیت‌های آهنی و گرانیت منیزیمی است.

بر طبق این نمودار، داده‌ها در محدوده سری‌های ماگمایی منیزین و در نتیجه در محدوده کالک‌آلکالن قرار دارند (شکل ۱۴).

www.SID.ir

Archive of SID

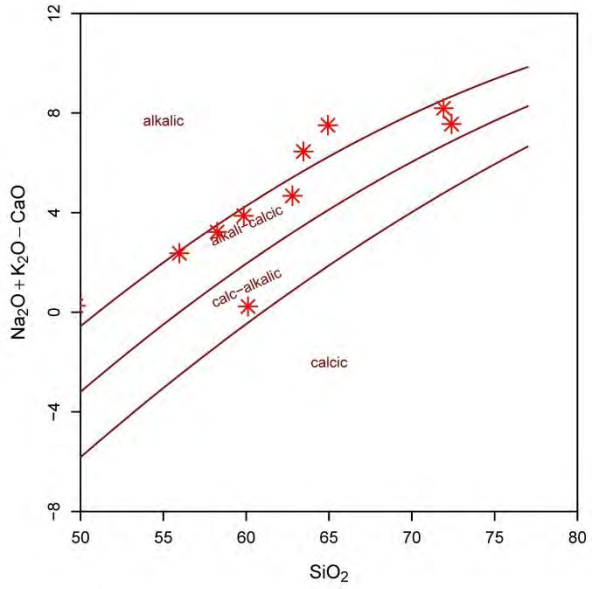


شکل ۱۴- نمودار ($FeO/(FeO+MgO)$) در مقابل SiO_2، فراست و همکاران(۲۰۰۱)

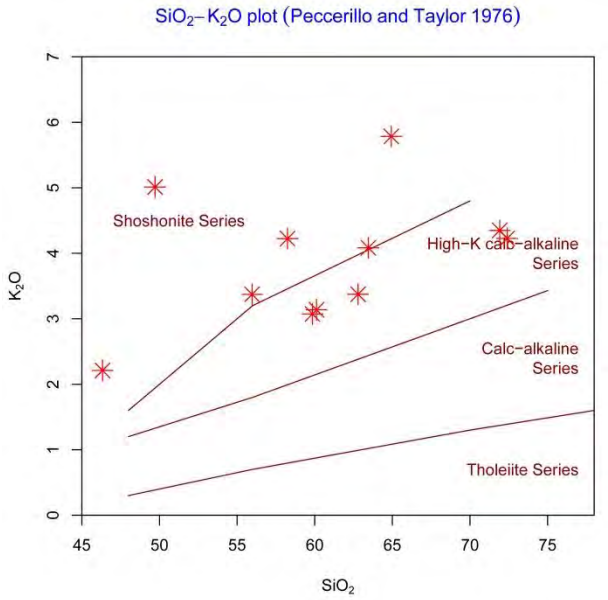
دومین متغیر فراست و همکاران شاخص آلکالن– کلسیک اصلاح شده است که بر مبنای سه متغیر $Na_2O + K_2O$ و CaO و SiO_2 مجموعه‌های ولکانیک را به ۴ گروه شامل: آلکالی (شاخص آلکالن کلسیک کمتر از ۵۱)، آلکالن– کلسیک (شاخص آلکالن کلسیک بین ۵۱- ۵۶) ، کالک آلکالن (شاخص آلکالن کلسیک بین ۵۶- ۶۱) و کلسیک (شاخص آلکالن– کلسیک بیشتر از ۶۱) تقسیم‌بندی کرد. فراست و همکاران [۲۱] سه متغیر به کار برده شده را به دو متغیر شامل $Na_2O + K_2O - CaO$ و SiO_2 کاهش دادند به همین دلیل آن را شاخص آلکالن کلسیک اصلاح شده نامیدند. بر پایه این نمودار سنگ‌های منطقه در محدوده آلکالی– کلسیک و آلکالی و نزدیک به مرز با ماگمای آلکالی قرار دارد (شکل ۱۵).

۳-۴-۴- نمودار پسیرلو و تیلور(۱۹۷۶)

نمودار K_2O در مقابل SiO_2 پسیرلو و تیلور [۲۲]، نشان می‌دهد که محدوده وسیعی از K_2O وجود دارد به طوری‌که سنگ‌ها در بخش‌های مختلف این نمودار از سری تولئیتی تا کالک آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیتی قرار می‌گیرند. با توجه به این نمودار سنگ‌های منطقه از سری کالک آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی تقسیم‌بندی می‌شوند که با بالا بودن میزان K در منطقه قابل توجیه است (شکل ۱۶).



شکل ۱۵- نمودار Na_2o+K_2O-CaO در مقابل SiO_2، فراست و همکاران(۲۰۰۱)



شکل ۱۶- نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (پسیرلو و تیلور ، ۱۹۷۶)

۳-۴-۵- بررسی شاخص اشباع‌شدگی آلومین در سنگ‌های آذرین منطقه

شاند [۲۳] بر اساس شاخص اشباع از آلومین ASI، گرانیتوییدها را به سه گروه پرآلومین، متاآلومین و پرآلکالن دسته‌بندی کرد. هیدمن [۲۴] گروه دیگر ساب‌آلومین را نیز به آن اضافه کرد. شاخص اشباع از آلومین با رابطه‌های ۱ و ۲ معرفی می‌شود.

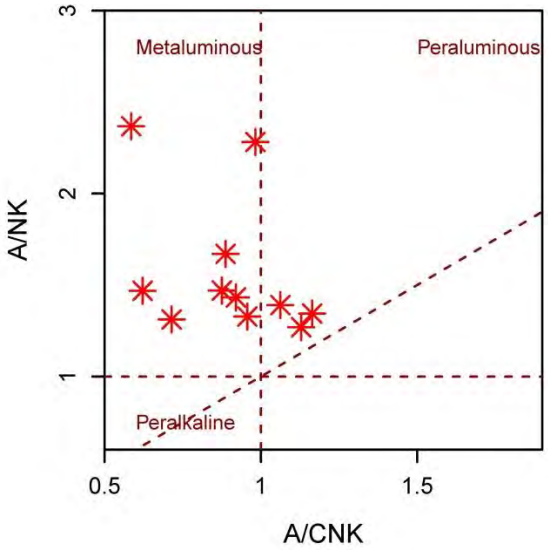
$$A/NK=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) \quad (۱)$$

$$A/CNK=Al2O3/(CaO+Na2O+K2O) \quad (۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

زن [۲۵] و چاپل [۲۶] رابطه دوم را شاخص اشباع آلومین نامیدند. در صورتی‌که A > CNK باشد گرانیتویید پرآلومین است، اگر CNK > A > NK گرانیتویید متاآلومین است، اگر A < NK در این صورت گرانیت پرآلکالن و در صورتی‌که A≅NK گرانیتویید ساب‌آلومین است[۲۷]. پیکولی و مانیار [۲۸] مشابه رابطه‌های فوق برای گرانیت پرآلومین رابطه A/CNK >1 برای گرانیت متاآلومین رابطه‌های A/CNK<1 و A/NK >1 و در مورد گرانیت‌های پرآلکالن رابطه A/NK >1 را معرفی کردند. بر اساس نمودار مانیار و پیکولی بیشتر نمونه در محدوده گرانیت پرآلومین و متاآلومین قرار می‌گیرد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷- نمودار تعیین گرانیت آلومین و پرآلومین (مانیار و پیکولی-۱۹۸۹)

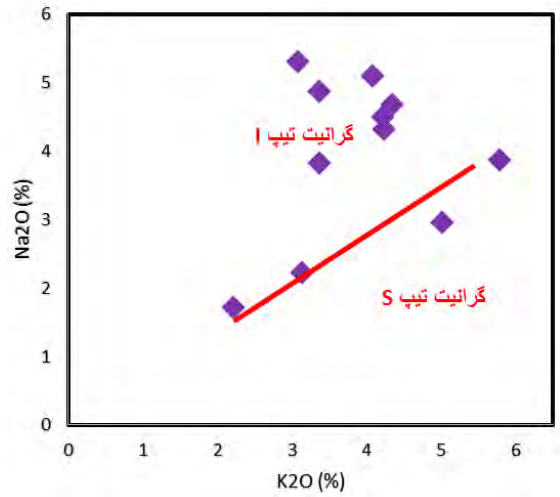
۳-۵- منشا گرانیتوییدهای منطقه آرود

۳-۵-۱- نمودار تعیین منشا گرانیت با استفاده از نمودار Na_2O در مقابل K_2O (نمودار چاپل و وایت)

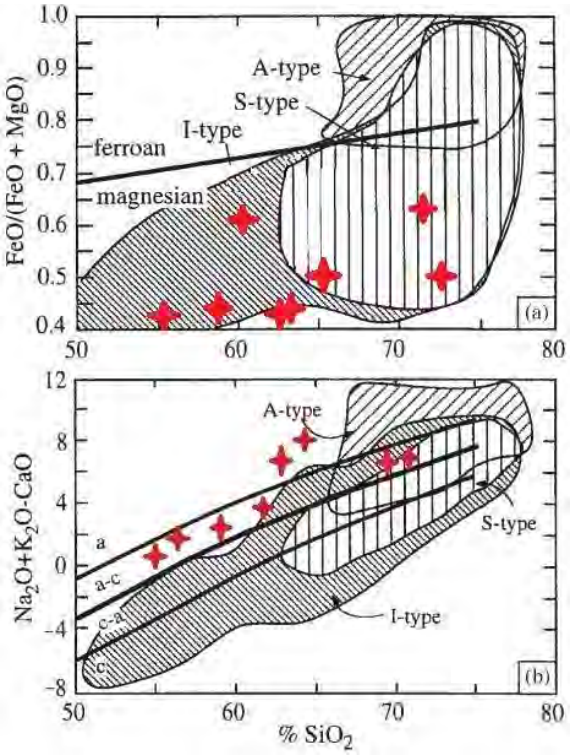
سنگ‌های گرانیتوییدی منطقه آرود ویژگی‌های پرآلومین دارند. با در نظر گرفتن مقدار ASI = 1/1 به عنوان مرز بین گرانیتوییدهای I و S و مراجعه به شکل ۱۸ مشخص می‌شود که بیشتر نمونه‌های گرانیتوییدی آرود در محدوده گرانیت‌های نوع I واقع‌شده‌اند ولی این نوع گرانیت می‌تواند از نوع I پرآلومین باشد زیرا کانی‌های همراه آن آندالوزیت، بیوتیت و مگنتیت است. با بهره‌گیری از نمودار Na_2O در مقابل K_2O (چاپل و وایت[۲۶]) نیز سنگ‌های مورد بحث در قلمرو گرانیت‌های نوع I قرارگرفته‌اند. قرارگیری دو نمونه در نزدیک تقسیم‌بندی ممکن است نشان‌دهنده اختلاط پوسته‌ای در این نمونه‌ها باشد (شکل ۱۸).

۳-۵-۲- نمودار تعیین منشا گرانیت با استفاده از نسبت $FeO/(FeO+MgO)$ در مقابل SiO_2

فراست و همکاران [۲۱] با استفاده از نمودارهای زیر گرانیت‌های تیپ I و S را از یکدیگر جدا کردند. بر پایه این نمودار، نمونه‌های منطقه سه‌هزار در محدوده گرانیت‌های تیپ I و S قرار دارد. بر پایه این نمودار می‌توان چنین نتیجه گرفت که گرانیت در منطقه سه‌هزار حاصل از آلایش ماگما هم از پوسته و هم حاصل از فرآیندهای فرورانش است (شکل ۱۹).



شکل ۱۸- نمودار Na_2O در مقابل K_2O برای تمایز گرانیت‌های تیپ I و S



شکل ۱۹- نمودار فراست و همکاران برای جدا کردن گرانیت تیپ I و S

www.SID.ir

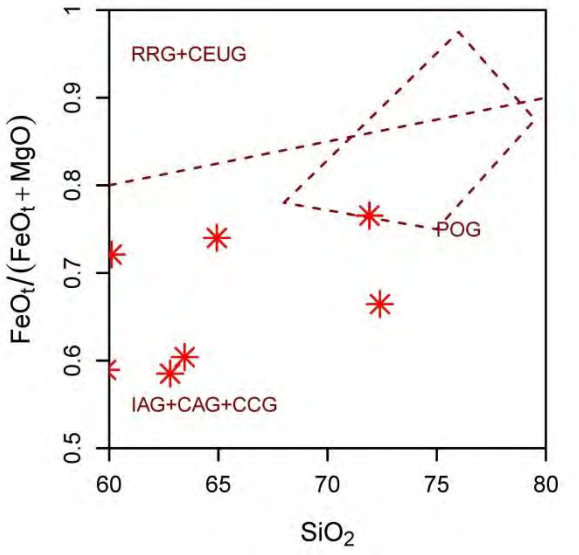
Archive of SID

۳-۶- تعیین جایگاه تکتونیکی گرانیت

۳-۶-۱- تقسیم‌بندی مانیار و پیکولی

در این تقسیم‌بندی گرانیتوییدها به دو دسته کوهزایی و غیرکوهزایی تقسیم‌بندی شده‌اند که از میان آن‌ها گرانیتوییدهای کوهزایی شامل زیرگروه گرانیتوییدهای جزایر قوسی (IAG)، گرانیتوییدهای قوس قاره‌ای (CAG)، گرانیتوییدهای برخورد قاره‌ای (CCG) و گرانیت‌های پس از کوهزایی (POG) است [۲۸]. گرانیتوییدهای غیر کوهزایی به دو زیرگروه گرانیتوییدهای مرتبط با کافت بین اقیانوسی (RRG) و گرانیتوییدهای مرتبط با بالازدگی خشکی‌زایی قاره (CEUG) تقسیم شده‌اند. نموداری که از مانیار و پیکولی مورد استفاده قرارگرفته است با توجه به SiO_2 و FeO_t و MgO به جداسازی محیط تکتونیکی پرداخته است [۲۸].

با توجه به نمودار مانیار و پیکولی [۲۸] (شکل ۲۰) محیط تکتونیکی منطقه را می‌توان از نوع گرانیت‌های کوهزایی دانست که با توجه به آن‌که مقدار A/CNK کمتر از ۱٫۴ است. گرانیت از نوع کوهزایی مرتبط با محیط برخورد قاره‌ای (CCG) بوده است.



شکل ۲۰- نمودار مانیار و پیکولی

۳-۶-۲- تقسیم‌بندی باچلور- بودن

در این نمودار، از معیارهای کاتیونی R_1 و R_2 که توسط دلاروش و همکاران [۱۰] در نمودار سنگ‌شناسی معرفی شده است، استفاده شد. از ویژگی‌های بارز این نمودار مرحله‌بندی فرآیندهای تکتونیکی از قبل از کوهزایی تا مرحله آخر کوهزایی است.

طبق نمودار باچلور و بودن [۳۰] گرانیت‌های منطقه آرود را می‌توان به بخش پس از برخورد تا مرحله آخرکوهزایی نسبت داد (شکل ۲۱). دو نمونه از این نمونه‌ها در منطقه همزمان با برخورد قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده وجود جایگاه تکتونیکی وابسته به زون گرانیت تیپ S است. با توجه به نتایج به دست آمده از این نمودار می‌توان چنین نتیجه گرفت، گرانیت‌ها ناشی از زون فرورانش است که تحت آلایش با ماگمای پوسته‌ای قرار گرفته است.

۳-۷- بررسی گرانیت‌های منطقه سه‌هزار از نظر پتانسیل کانی‌زایی

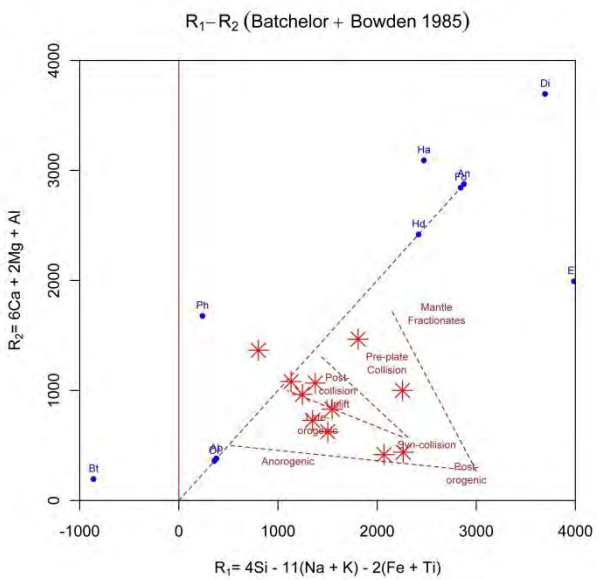
نحوه رخداد و منشا فلزات و عناصر کانه‌ساز در محیط‌های تکتونوماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای و فرورانش مورد بررسی بسیاری از محققان پترولوژی بوده است. این محققان به دنبال بررسی ماگما از نظر منشا و تحولات انجام گرفته در ماگماند و از طرفی محققان معدن به دنبال پیدا کردن رابطه بین فلزات کانه‌ساز و منشا ماگما برای یافتن پتانسیل کانی‌زایی در منطقه با استفاده از داده‌های ژئوشیمی‌اند. بررسی ژئوشیمیایی سیلیکات‌های مولد ذخایر اسکارن و پورفیری معیاری مناسب برای شناخت وضعیت فلززایی است [۳۱]. با توجه به نتایج به دست آمده از این مقاله گرانیت آرود از نوع I و ماگمای آن از نوع آلکالن تا کالک آلکالن و از نوع پرآلومین است. برای یافتن پتانسیل‌های کانی‌زایی، مینرت تعداد زیادی از توده‌های اسکارنی را از دیدگاه کانی‌زایی‌های طلا، قلع، تنگستن، مس، آهن و روی مورد تجزیه شیمیایی قرار داد و بدین ترتیب مقداری متوسط از این عناصر را به دست آورد و محدوده‌ای را به عنوان محدوده امکان‌پذیر برای کانی‌زایی مشخص کرد [۳۲]. این نمودارها به ترتیب عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی را مورد بررسی قرار می‌دهند [۳۳].

۳-۷-۱- عناصر اصلی

در نمودار (Na_2O+K_2O) در مقابل SiO_2 نمودار میدلموست [۸] نمونه‌ها در منطقه مونزودیوریت، تونالیت، مونزونیت و مونزوگرانیت قرار می‌گیرند (شکل ۲۲). با توجه به این نمودار نمونه‌ها در محدوده آلکالن در محدوده مرتبط با اسکارن Cu و Zn است. با توجه به نمودار AFM آروین و باراگار [۲۰] که برای جدا کردن نمونه‌های ساب‌آلکالن این توده است، نمونه‌ها در محدوده اسکارن Cu و Fe قرار می‌گیرد (شکل ۲۳). این داده‌ها در منطقه کالک‌آلکالن در ارتباط با توده‌های اسکارنی است [۳۲]. نمونه‌ها به ماگمای کالک‌آلکالن گرایش بیشتری نشان می‌دهند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲۱- نمودار باچلور و بودن

در نمودار K_2O در مقابل SiO_2 داده‌ها در محدوده با پتاسیم بالا قرار می‌گیرد که با توده‌های اسکارنی مرتبط با پتاسیم بالا متناسب است. در این نمودار داده‌های توده اسکارنی با اسکارن Fe-Cu-Au مرتبط است (شکل ۲۴).

۳-۷-۲- گرانیت و فلززایی

با توجه به رابطه مهمی که بین ماهیت گرانیت و پتانسیل کانی‌زایی وجود دارد، همچنین با در نظر گرفتن اینکه تیپ گرانیت مورد مطالعه در منطقه سه‌هزار از نوع گرانیت تیپ I و از نوع خاص پرآلومین تعیین شده است [۲۹]. نتایج زیر به دست می‌آید:

- گرانیت پرآلکالن اغلب به علت بالا بودن عناصر فرار فلوئور و کلر می‌توانند ذخایر قلع تنگستن، روی و بور را ایجاد کنند. البته به ندرت دیده شده که این ذخایر عیار بالایی را در گرانیتوییدهای تیپ I به وجود آورند و اغلب ذخایر قلع و تنگستن همراه گرانیتوییدهای تیپ S مشاهده شده است.

- کانسارهای اکسیدهای آهن مگنتیت و هماتیت به همراه عناصر فرعی مس و طلا نیز همراه گرانیت‌های با ماهیت اکسیدی دیده می‌شوند [۳۴]. مشاهدات صحرایی انجام شده در منطقه حضور کانی‌های اکسیدی آهن را تایید کرده است.

- ماگماهای تیپ I با ماهیت اکسیدان، متعلق به سری مگنتیتی و دارای مجموعه عناصر کالکوفیل‌اند که می‌توانند پتانسیل خوبی برای ایجاد ذخایر مس و مس- مولیبدن به صورت پورفیری باشند. با توجه به بررسی‌های انجام شده بر روی مقاطع صیقلی، کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت مشاهده شدند.

- کانی‌های میکا، پیروکسن و آمفیبول حاوی بیشترین عناصر فلزی در ماگماهای سیلیکاته‌اند. عناصر تنگستن در ساختمان بیوتیت، روی و منگنز در ساختمان ماگماهای غنی از کلسیم، آهن و منیزیم در ساختمان کانی‌های اسپینل، آمفیبول، میکا و پیروکسن جانشین می‌شود، عناصر اسکاندیم و وانادیم نیز در ساختمان پیروکسن مقدارش بالاست.

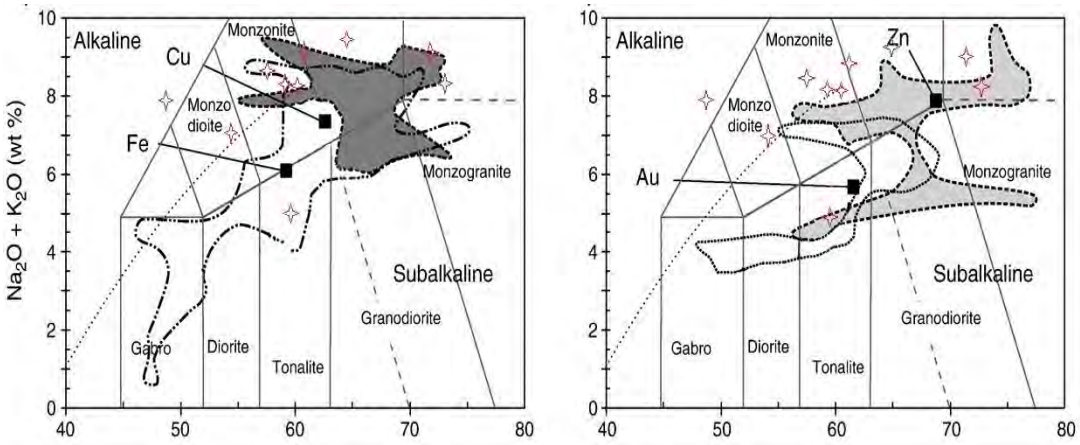
- با توجه به نمودارهای ماینرت [۳۳] این نکته به دست می‌آید که این توده‌ها می‌تواند با ذخایر آهن- طلا- مس مرتبط باشد.

- به طورکلی عناصر فلزی Cu، Co و Pb اغلب همراه با کانی‌های سولفیدی در ماگما متمرکز می‌شوند و در مقابل عناصر Nb و Ta در ساختمان کانی‌هایی مانند روتیل جای می‌گیرند. قلع نیز در یک سیال غنی از F، Li و B متمرکز می‌شود.

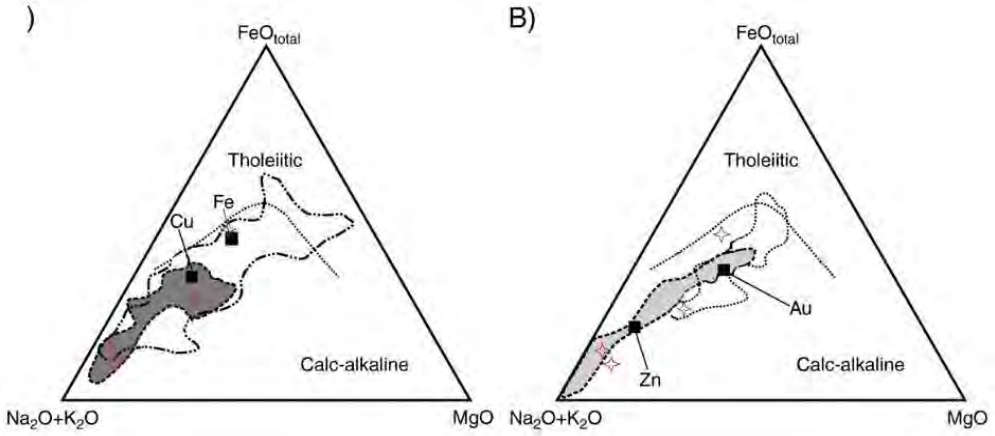
- در منطقه سه‌هزار کانی‌های آمفیبول، بیوتیت، آلبیت و ارتوز به عنوان مهم‌ترین منشا عناصر کانه‌ساز مطرح‌اند، به‌گونه‌ای که وجود کانی‌های تیره فراوان در مقاطع میکروسکوپی نیز قابل مشاهده است.

www.SID.ir

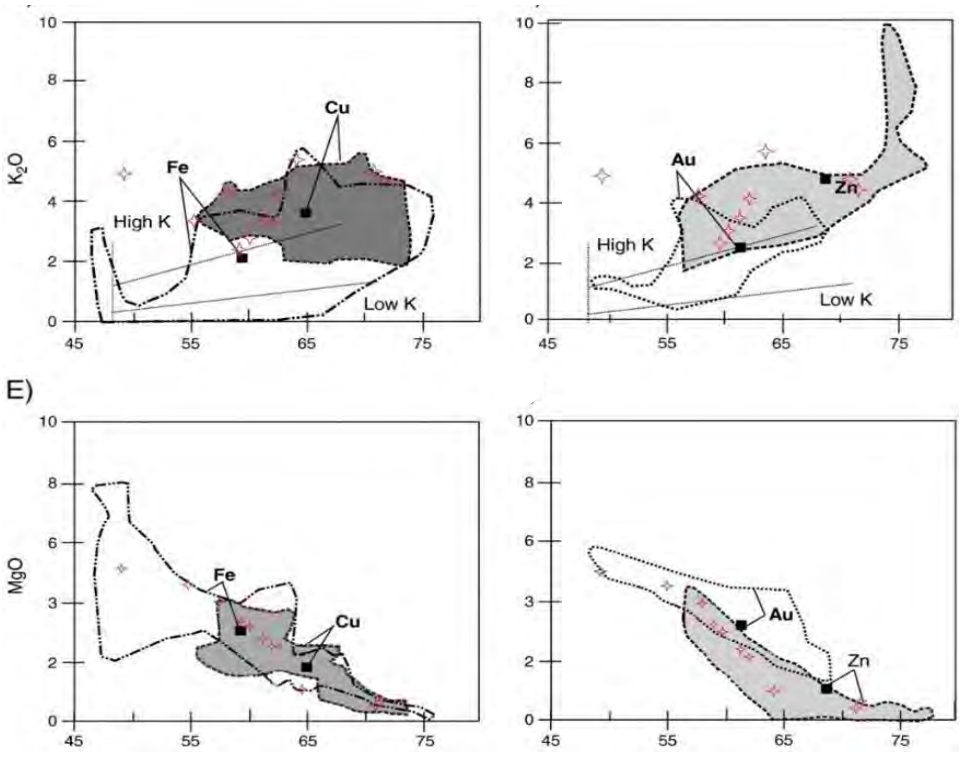
Archive of SID



شکل ۲۲- نمودار (Na_2O+K_2O) در مقابل SiO_2، نمودار میدلموست



شکل ۲۳- نمودار طبقه‌بندی آلکالی سیلیکات و محدوده آلکالی- ساب‌آلکالی



شکل ۲۴- نمودارهای عناصر اصلی در مقابل SiO_2 با میزان K_2O بالا، متوسط و پایین و MgO در مقابل سیلیس

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۷-۳- رابطه بین جایگاه تکتونیکی و پتانسیل کانی‌زایی در منطقه سه‌هزار

با توجه به اینکه جایگاه منطقه سه‌هزار در ناحیه البرز مرکزی است، چنین به نظر می‌رسد که این منطقه ترکیبی از دو نوع تیپ گرانیت I و S باشد (البته شواهد این‌گونه نشان می‌دهد که گرانیت از نوع I است و البته آغشتگی‌هایی از پوسته نیز در این منطقه وجود دارد). جایگاه تکتونیکی از نمودارهای استاندارد شامل پیرس و همکاران [۳۵]، شاندل و گورتون [۳۶] و مولر و گرووز [۳۷] این موضوع را نشان می‌دهد که این منطقه در مرز ماگماهای مرتبط با صفحه‌های درون قاره و مرتبط با صفحه‌های اقیانوسی است که البته با شواهد مربوط به نمودارهای هارکر و عنکبوتی این نتیجه به دست می‌آید که گرانیت از نوع تیپ I و مربوط به زون فرورانش است. تبادلات یونی و عنصری شکل‌گرفته در محیط‌های فرورانش به هنگام نفوذ صفحه اقیانوسی به زیر پوسته قاره‌ای تحت تاثیر تحرک سیالات فازهای فرار و فعل و انفعالات شیمیایی بین مواد منشا گرفته از صفحه فرورو با گوه گوشته‌ای است. به عقیده ریچارد [۳۸] عناصر آهن، مس، طلا، LILE و HFSE در هنگام شکسته شدن صفحه فرورو و به دو روش زیر این عمل انجام می‌شود.

الف- غنی شدن آن‌ها در اجزا سیال انتقال‌یافته[۲۲]

ب- غنی شدن این عناصر در صفحه ذوب‌شده[۲۳]

آنچه مهم است این است که مجموعه عناصر سیدروفیل و کالکوفیل مس، طلا و آهن به دلیل محتوای بالای فوگاسیته اکسیژن در محیط و گوگرد دوست بودن به همراه عناصر لیتوفیل LILE سبک در ماگمای ذوب بخشی متمرکزند که به بخش‌های کم عمق تزریق می‌شوند. این مکانیزم جای‌گیری موجب ایجاد ذخایر مس±طلای پورفیری و آهن IOCG، اسکارن و اپی‌ترمال می‌شود. پوسته اقیانوسی دارای مقادیر بالای آهن (در ساختمان پوسته یا رسوبات سطحی) دارای ماهیت اکسیدان قوی منجر به تشکیل Fe^{3+} می‌شود که در نتیجه ماگما قادر است مقادیر بالایی از آهن و مس را در خود حل کند و به سطح آورد [۳۹]. یکی از دلایل وجود مگنتیت به صورت پراکنده در ذخایر مس ± طلای پورفیری و ذخایر آهن IOCG از این پدیده ناشی می‌شود.

۳-۸- تایید ارتباط عناصر طلا- مس- آهن با استفاده از روش زمین‌آمار

برای تحلیل داده‌ها ابتدا نرمال‌سازی داده‌ها انجام گرفت. اولین گام در استفاده از روش‌های زمین‌آماری بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها به وسیله آنالیز واریوگرام است. شرط استفاده از این آنالیز، نرمال بودن داده‌ها است. برای پیوستگی مکانی یک متغیر به وسیله واریوگرام لازم است تا مجموع مربع تفاضل زوج نقاطی که به فاصله معلوم h از یکدیگر قرار دارند محاسبه و در مقابل h ترسیم شود [۴۰]. اجزای یک واریوگرام عبارتند از:

الف- دامنه تاثیر: فاصله‌ای که در آن واریوگرام به حد ثابتی می‌رسد و به حالت خط افقی نزدیک می‌شود. این دامنه محدوده‌ای را مشخص می‌کند که می‌توان از داده‌های موجود در آن برای تخمین مقدار متغیر مجهول استفاده کرد و در خارج از این فاصله دیگر پیوستگی مکانی وجود ندارد و نمونه‌ها به صورت مستقل عمل می‌کنند.

ب- حد آستانه: به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تاثیر به آن می‌رسد حد آستانه گفته می‌شود. این مقدار برابر واریانس کل نمونه‌هایی است که در محاسبه واریوگرام به کار رفته‌اند.

پ- اثر قطعه‌ای (واریانس بدون ساختار): مقدار واریوگرام در مبدا مختصات یعنی به ازا h=0 را اثر قطعه‌ای می‌نامند که جزو تصادفی یا غیر ساختاردار متغیر را نشان می‌دهد و در حالت ایده‌ال باید صفر باشد. اما بیشتر مواقع بزرگ‌تر از صفر است. واریوگرام بر اساس مقادیر زوج نقاطی که در یک راستا و یک فاصله مشخص از یکدیگر قرار گرفته‌اند ترسیم می‌شود. روش‌های مختلفی برای برآورد متغیرهایی که تغییرات زمانی و مکانی دارند، وجود دارد. در این تحقیق از روش کریجینگ نقطه‌ای استفاده شد. کریجینگ تخمینگری است که مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه‌برداری نشده به صورت ترکیبی خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می‌گیرد و برای برآورد نقاط ناشناخته به هر یک از نمونه‌ها، وزنی نسبت می‌دهد. روش کریجینگ بهترین تخمینگر نااریب خطی با کمترین مقدار واریانس است [۴۱]. در اینجا تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری با استفاده از نرم‌افزار GS+ انجام شد.

واریوگرام متغیرهای مورد مطالعه در شکل‌های ۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۲۸ ارایه شده است و پارامترهای آن‌ها در جدول ۱ موجود است. با توجه به شکل‌های فوق و جدول ۱، ساختار کروی به عنوان بهترین مدل برازش داده شده برای داده‌ها است. سه عنصر Au, Cu, Fe تا فاصله‌ای حدود ۳۵۰ متری ساختار وابسته به مکان را نشان می‌دهند. طبق نظر جیاچون و همکاران [۴۲] این امر ممکن است ناشی از یکسان بودن منشا این عناصر در منطقه مورد مطالعه باشد.

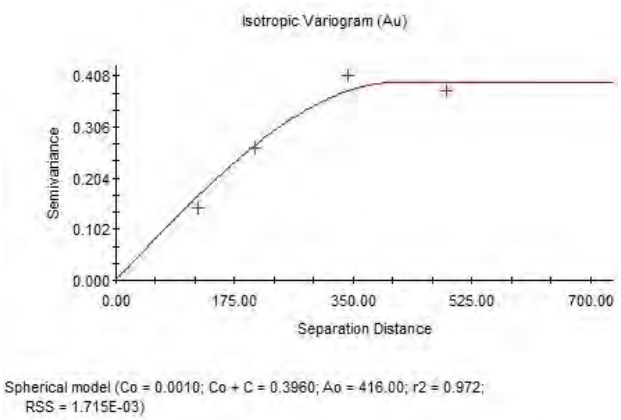
www.SID.ir

Archive of SID

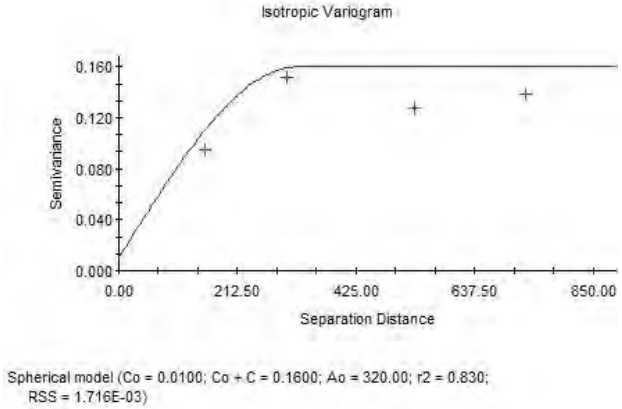
نسبت بخش ساختاری واریانس به کل واریانس داده‌ها را که با $C/(C+C_O)$ نشان می‌دهند، هر اندازه به یک نزدیک‌تر باشد، بهتر و نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تر است. با توجه به جدول ۱، مقدار $C/(C+C_O)$ عناصر نزدیک به یک به دست آمد که وجود همبستگی مکانی قوی و بسیار خوب را نشان می‌دهد.

جدول ۱- نتایج برازش مدل کروی در واریوگرام‌ها

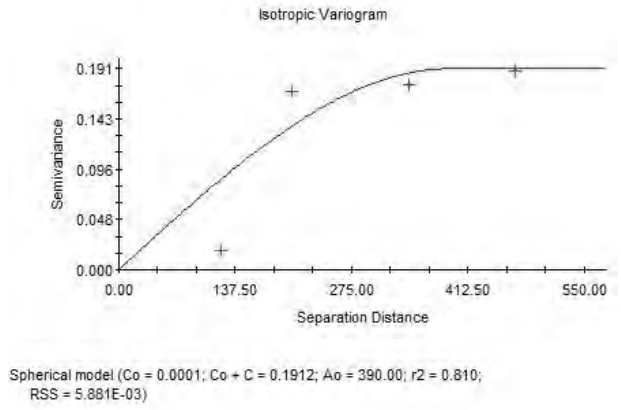
متغیر	مدل	اثر قطعه‌ای (C_o)	آستانه ($C+C_o$)	دامنه تاثیر (متر)	$C/(C+C_O)$	ضریب همبستگی R^2
Au	کروی	۰/۰۰۱	۰/۳۹۶	۴۱۶	۰/۹۹۷	۰/۹۷۲
Cu	کروی	۰/۰۰۰۱	۰/۱۹۱۲	۳۹۰	۰/۹۹۹	۰/۸۱۰
Fe	کروی	۰/۰۱	۰/۱۶	۳۲۰	۰/۹۳۸	۰/۸۳۰
W	کروی	۰/۰۰۱	۱/۰۰۰	۷۰۰	۰/۹۹۹	۰/۹۸۹



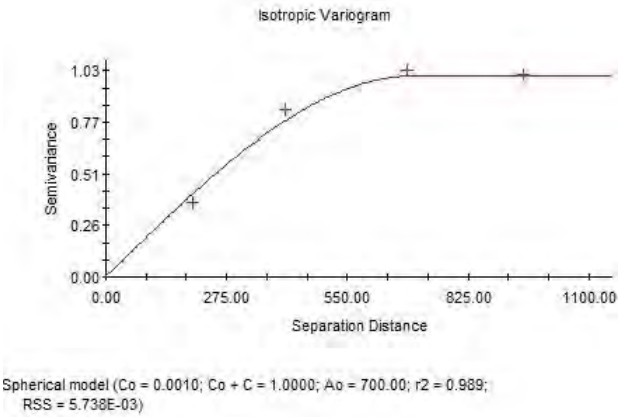
شکل ۲۵: واریوگرام Au در منطقه مورد مطالعه



شکل ۲۷: واریوگرام Fe در منطقه مورد مطالعه



شکل ۲۶: واریوگرام Cu در منطقه مورد مطالعه



شکل ۲۸: واریوگرام W در منطقه مورد مطالعه

۴- نتایج و بحث

در این بررسی برای ارزیابی صحت واریوگرافی از روش اعتبارسنجی متقابل[۲۴] استفاده شده است. در این روش همه داده‌های اولیه، یک به یک و به ترتیب از محاسبات خارج شده و دوباره با استفاده از مدل واریوگرام و سایر داده‌ها برآورد می‌شوند، سپس از مجموع تفاضل مقادیر اولیه با مقادیر برآورد شده برای ارزیابی صحت واریوگرافی استفاده می‌شود. در نهایت با محاسبه دو آماره میانگین خطا (MAE) و خطای برآورد (RMSE) درباره اعتبارسنجی مدل واریوگرام قضاوت می‌شود.

خطای قدرمطلق میانگین[۲۵] از رابطه ۳ به دست می‌آید.

www.SID.ir

Archive of SID

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{x=1}^{n}\left|\hat{z}(x) - z(x)\right| \quad (۳)$$

خطای مجذور میانگین استاندارد شده[۲۶] از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[z(x_i) - \hat{z}(x_i)\right]^2} \quad (۴)$$

که در این فرمول‌ها:

N تعداد نمونه

$z(x)$ مقدار نمونه معلوم

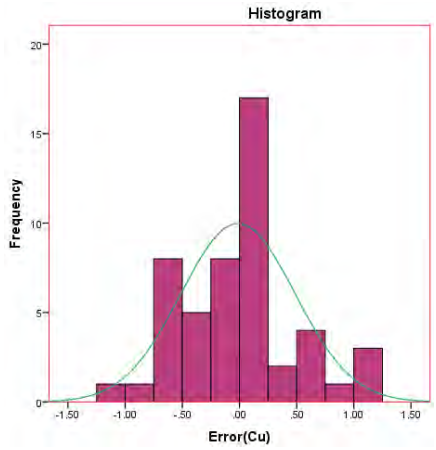
$\hat{z}(x)$ مقدار برآورد شده برای نقطه x

مقادیر این پارامتر هرچه به عدد صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده تخمین بهتر مدل مورد استفاده در ارزیابی مقادیر مجهول پارامتر مورد استفاده است ([۴۳]، [۴۴]).

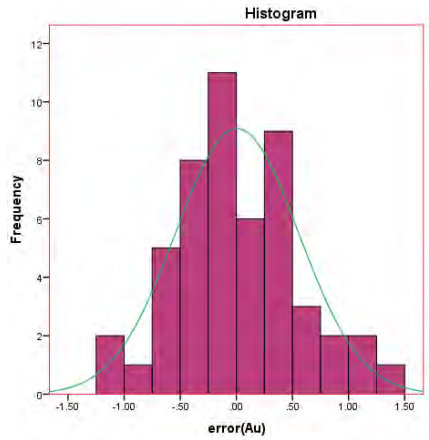
در این تحقیق با سعی و خطا مناسب‌ترین الگوی متغیرهای مورد مطالعه تعیین شد. معیارهای کنترل اعتبار واریوگرام‌های مورد مطالعه در جدول ۲ خلاصه شده است. مقادیر میانگین خطای مطلق نزدیک به صفر و بیانگر صحت بالای مدل واریوگرام است، همچنین پایین بودن میانگین مجذور خطا نیز بیانگر دقت قابل قبول واریوگرافی است، بنابراین می‌توان اظهار کرد که نتایج کنترل اعتبار واریوگرام بیانگر مناسب بودن پارامترهای مدل‌های برازش داده شده بر واریوگرام‌های تجربی است. شکل ۲۹ تا شکل هیستوگرام‌های آنالیز باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد و همانطور که مشخص است آنالیز باقیمانده هر ۴ عنصر نزدیک به صفر است.

جدول ۲- پارامترهای کنترل اعتبار واریوگرام‌ها در منطقه مورد مطالعه

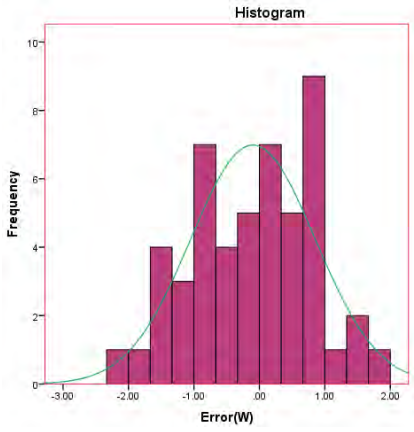
متغیر	RMSE	MAE
Au	۰/۵۴۳۳	۰/۰۰۶۲
Cu	۰/۲۴۵۴	۰/۰۱۳۰
Fe	۰/۱۷۳۶	۰/۰۰۹۱
W	۰/۸۹۷۲	۰/۰۹۸۷



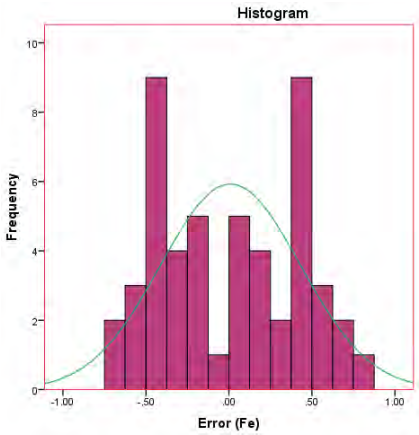
شکل ۲۹- هیستوگرام آنالیز باقیمانده‌های عنصر Cu



شکل۳۱- هیستوگرام آنالیز باقیمانده‌های عنصر Au



شکل ۳۱- هیستوگرام آنالیز باقیمانده‌های عنصر W



شکل ۳۲- هیستوگرام آنالیز باقیمانده‌های عنصر Fe

www.SID.ir

Archive of SID

۵- نتیجه‌گیری

بر پایه رده‌بندی اشتریکایزن(۱۹۷۶)، میدلموست(۱۹۹۴)، کاکس و همکاران(۱۹۷۹)، دلاروش و همکاران(۱۹۸۰) و اوکنور (۱۹۶۵) سنگ‌های منطقه از نوع گرانیت، گرانودیوریت، سینیت تا کوارتزسینیت و کوارتزمونزونیت‌اند. به طورکلی نام‌گذاری این سنگ‌ها به روش‌های مختلف نتایج تقریبا مشابهی داشته است.

با توجه به نمودارهای آروین و باراگار سنگ‌ها در منطقه سه‌هزار در محدوده آلکالن تا ساب‌آلکالن قرارگرفته‌اند. در نمودار فراست سنگ‌ها در محدوده منیزین، آلکالی‌کلسیک تا آلکالی که داده بیشتر به آلکالی متمایزند. بر اساس نمودار کاکس ماگما در بخش آلکالن تا ساب‌آلکالن قرار می‌گیرد، البته ماگما به ماگمای آلکالن نزدیک‌تر است. در نمودار پسیرلو و تیلور سنگ‌ها در محدوده شوشونیتی تا آلکالی‌کلسیک پتاسیم بالا قرار می‌گیرد. بر اساس نمودار مانیار و پیکولی نمونه‌ها در محدوده پرآلومین و متاآلومین قرار می‌گیرد. مقدار شاخص A/CNK در این نمونه‌ها بین ۰٫۶ تا ۱٫۲ است. با استفاده از این نمودارها نتیجه گرفته می‌شود که ماگما از نوع آلکالن تا کالک آلکالن است و از نوع منیزین و در محدوده متاآلومین تا پرآلومین است.

با توجه به نتایج به دست‌آمده از بررسی‌های ژئوشیمیایی مانند بررسی‌های انجام شده بر روی منشا ماگما و جایگاه تکتونیکی که ماگما از آن ناشی شده است که با توجه به نمودارهای استاندارد و نیز نمودارهایی که تیپ گرانیت را می‌توان از روی آن‌ها به دست آورد، تیپ گرانیتی منطقه آرود از نوع I است که جایگاه تکتونیکی آن از نوع حاشیه فعال قاره‌ای است. نکته‌ای که در این بررسی‌ها مهم بوده است این است که برخی از داده‌ها رفتار بینابینی از خود نشان می‌دهند و هم خاصیت گرانیت‌های تیپ S و هم خاصیت‌های گرانیت تیپ I را از خود نشان می‌دهند. این نکته با توجه به نمودار مانیار و پیکولی حاصل شده است که با توجه به تکتونیک منطقه می‌تواند قابل قبول باشد.

کانسارهای اکسیدهای آهن مگنتیت و هماتیت به همراه عناصر فرعی مس و طلا نیز همراه گرانیت‌های با ماهیت اکسیدی دیده می‌شوند. مشاهدات صحرایی انجام شده در منطقه وجود کانی‌های اکسیدی آهن را تایید کرده است. ماگماهای تیپ I با ماهیت اکسیدان، متعلق به سری مگنتیتی و دارای مجموعه عناصر کالکوفیل‌اند که می‌توانند پتانسیل خوبی برای ایجاد ذخایر مس، مس- مولیبدن، به صورت پورفیری باشند. با توجه به بررسی‌های انجام شده بر روی مقاطع صیقلی، کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت مشاهده شدند.

مطالعات زمین‌آماری برای عناصر مورد نظر نشان داد که عناصر Au, Fe, Cu همبستگی مکانی در حدود ۳۵۰ متر دارند که این امر می‌تواند ناشی از یکسان بودن منشا این عناصر در منطقه مورد مطالعه باشد. ولی عنصر W همبستگی در حدود ۷۰۰ متر را دارد که با سایر عناصر تفاوت چشمگیری دارد. نتایج صحت‌سنجی همان‌گونه که بیان شده است نشانگر دقت قابل قبول واریوگرافی است.

با توجه به نمودارهای ماینرت، همبستگی مکانی عناصر و بررسی‌های انجام شده این نتیجه به دست می‌آید که این توده می‌تواند با ذخایر آهن- طلا- مس مرتبط باشد و پتانسیل تشکیل کانسار را دارد که این نتایج با مطالعات ژئوشیمی که در منطقه انجام شده است، مطابقت دارد.

مراجع

[۱] شرکت مهندسن مشاور کاوشگران، پی‌جویی و پتانسیل‌یابی مواد معدنی در منطقه آرود دره سه هزار. ۱۳۹۰.

[۲] آدابی, محمدحسین؛ کریم‌پور، محمدحسن؛ ۱۳۹۱؛ **«نامگذاری و طبقه بندی جامع سنگها رسوبی،آذین ودگرگونی»**، دانشگاه فردوسی مشهد.

[۳] سعادت، سعید؛کریم‌پور، محمدحسن؛ ۱۳۸۹؛ **«زمین شناسی اقتصادی کاربردی»**، چاپ ارسلان.

[4] Alavi, M. (1994). Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics, 229(3), 211-238.

[۵] دهقانی، معصومه؛ ۱۳۹۲؛ **«پتروگرافی و پترولوژی توده نفوذی و سنگهای طارم سفلی»**؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امام خمینی (ره).

[6] Streckeisen, A., Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites, and melilitic rocks: Recommendations and suggestions of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Geology, 1979. **7**(7): p. 331-335.

[7] Cox, K. G. (Ed.). (2013). The interpretation of igneous rocks. Springer Science & Business Media.

[8] Middlemost, E.A., Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-Science Reviews, 1994. **37**(3): p. 215-224.

[9] Miyashiro, A., Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. American Journal of Science, 1974. **274**(4): p. 321-355.

www.SID.ir

Archive of SID

[10] De La Roche, H., et al., A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses—Its relationships with current nomenclature. Chemical geology, 1980. **29**(1): p. 183-210.

[11] Rollinson, H., Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, 1993, 48-51. Longman Sci. Technol., New York.

[12] Barker, F. (1979). Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin. Trondhjemites, dacites and related rocks. Elsevier, Amsterdam, 1, 12.

[13] O'connor, J. T. (1965). A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. US Geological Survey Professional Paper B, 525, 79-84.

[14] ABDEL-RAHMAN, A. F. M. (1990). Petrogenesis of early-orogenic diorites, tonalites and post-orogenic trondhjemites in the Nubian Shield. Journal of petrology, 31(6), 1285-1312.

[15] Wilson, M. (1989). Igneous petrogenesis, Uniwin Hyman, London.

[16] Harker, A. (1909). The natural history of igneous rocks. Macmillam.

[17] Harker, A. (2011). The natural history of igneous rocks. Cambridge University Press.

[18] Rollinson, H.R. (1993). Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, Longman Sci. Technol., New York, 48-51.

[19] Kuno, H., Origin of andesite and its bearing on the island arc structure. Bulletin Volcanologique, 1968. **32**(1): p. 141-176.

[20] Irvine, T. and W. Baragar, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian journal of earth sciences, 1971. **8**(5): p. 523-548.

[21] Frost, B.R., et al., A geochemical classification for granitic rocks. Journal of Petrology, 2001. **42**(11): p. 2033-2048.

[22] Peccerillo, A. and S.R. Taylor, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to mineralogy and petrology, 1976. **58**(1): p. 63-81.

[23] Shand, S., Eruptive Rocks, their Genesis. Composition, Classification, and their Relationship to Ore-deposits, 1943.

[24] Hyndman, D.W., Petrology of igneous and metamorphic rocks. 1985.

[25] Zen, E., An (1986) Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: some mineralogic and petrographic constraints. J. Petrol. **27**: p. 1095-1117.

[26] Chappell, B. and A.J.R. White, Two contrasting granite types: 25 years later. Australian Journal of Earth Sciences, 2001. **48**(4): p. 489-499.

[27] Templ, M., Filzmoser, P., & Reimann, C. (2008). Cluster analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. Applied Geochemistry, 23(8), 2198-2213.

[28] Maniar, P.D. and P.M. Piccoli, Tectonic discrimination of granitoids. Geological society of America bulletin, 1989. **101**(5): p. 635-643.

[29] Chappell, B. and A. White, I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Geological Society of America Special Papers, 1992. **272**: p. 1-26.

[30] Batchelor, R.A. and P. Bowden, Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Chemical geology, 1985. **48**(1): p. 43-55.

[31] Chen, Y.-J., et al., Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview. Ore Geology Reviews, 2007. **31**(1): p. 139-169.

[32] Meinert, L.D., Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits–chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization. Magmas, fluids and ore deposits: Canada, Mineralogical Association of Canada, 1995. **23**: p. 401-418.

[33] Meinert, L.D., Acceptance of the Society of Economic Geologists Silver Medal for 2009. Economic Geology, 2010. **105**(8): p. 1520-1521.

[34] Sillitoe, R.H. and J.W. Hedenquist, Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. Special Publication-Society of Economic Geologists, 2003. **10**: p. 315-343.

[35] Pearce, J.A., N.B. Harris, and A.G. Tindle, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of petrology, 1984. **25**(4): p. 956-983.

[36] Schandl, E.S. and M.P. Gorton, Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. Economic Geology, 2002. 97(3): p. 629-642

[37] Müller, D., & Groves, D. I. (2000). Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization (Vol. 252). Berlin: Springer.

[38] Richards, J.P., High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: just add water. Economic Geology, 2011. **106**(7): p. 1075-1081.

[39] Bonin, B. and J. Bébien, The granite-upper mantle connection in terrestrial planetary bodies: an anomaly to the current granite paradigm? Lithos, 2005. **80**(1): p. 131-145.

www.SID.ir

Archive of SID

[40] Hassani pak, A.(1998). Geostatistics. Tehran University Press, 314p.

[41] Nshagali, B. G., Nouck, P. N., Meli'i, J. L., Arétouyap, Z., & Manguelle-Dicoum, E. (2015). High iron concentration and pH change detected using statistics and geostatistics in crystalline basement equatorial region. Environmental Earth Sciences, 73(11), 7135.

[42] Jiachun S., Hazian W., Jianming X., Jinjun W., Xingmei L., Haiping Z., and Shunlan J. 2006. Spatial distribution of heavy metals in soil: A case study of Changing, China. Environ ment al Geology Geol, 10:245-264.

[43] Webster, R. and Oliver, M.A. 2000. Geostatistics for environmental scientists. Wiley press, 271p.

[44] Marko, K., Al-Amri, N. S., & Elfeki, A. M. (2014). Geostatistical analysis using GIS for mapping groundwater quality: case study in the recharge area of Wadi Usfan, western Saudi Arabia. Arabian Journal of Geosciences, 12(7), 5239-5252.

پی‌نوشت‌ها

1. Fractional crystallization
2. Partial melting
3. Assimilation
4. Contamination
5. Magma mixing
6. normalized
7. Granular
8. Hyaloporphyritic
9. Vitrophyric
10. Streckeisen
11. Cross, iddings, pirsson and washington
12. Barker
13. O`Connor
14. Abdel- rahman
15. Tholeiitic magma series
16. Alkaline magma series
17. Calc- Alkaline magma series
18. Shoshonite magma series
19. Transformation magma series
20. Ferroan
21. Magnesian
22. Fluid transported
23. Slab melting
24. Cross Validation
25. Mean absolute error(MAE)
26. Root mean square standardized(RMSE)

www.SID.ir